



Edmundo Pereira Vieira Simões

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Avaliação do Comportamento Visco-Plástico de Misturas Betuminosas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Luís Manuel Trindade Quaresma, Professor
Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra
Vogais: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo
Prof. Engenheiro Luís Manuel Trindade Quaresma



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2013

“Copyright” Edmundo Pereira Vieira Simões, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço aqui a todos os que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Em primeiro lugar ao orientador deste trabalho, Professor Luís Quaresma, cujos conselhos e disponibilidade foram determinantes para ultrapassar dificuldades e propiciar a execução deste trabalho.

Ao Engenheiro Luís Filipe Carvalhais da Norvia pelo envio das amostras sem as quais esta dissertação não teria sido praticável.

Ao Professor Filipe Santos, ao André Almeida e ao senhor Vítor Silva pelo apoio prestado com o equipamento que viabilizou toda a atividade laboratorial.

À Professora Teresa Santana e ao Jorge Silvério pelo interesse e apoio prestados na fase inicial do trabalho nos laboratórios.

À dona Eduarda Ferreira do Departamento de Ciências da Terra cujo apoio na preparação das amostras foi imprescindível.

Agradeço também aos colegas Carlos Rodrigues e Manuel Rodrigues a constante troca de ideias sobre o tema bem como a ajuda prestada com material bibliográfico.

Por fim, mas acima de todos, agradeço e dedico este trabalho à minha Mãe, ao meu Pai, e à Susaninha. Sem a sua presença nada seria possível.

Avaliação do Comportamento Visco-Plástico de Misturas Betuminosas

Resumo

As misturas betuminosas aplicadas em pavimentos de infraestruturas de transporte podem contribuir para a ocorrência de cavados de rodovia importantes que afetam as condições de circulação em resultado de grandes deformações por corte quando se atinge a superfície de cedência.

Sendo assim é essencial proceder ao estudo do comportamento das misturas betuminosas. Atualmente, e atendendo ao facto de estas apresentarem uma natureza viscosa, vários modelos têm sido desenvolvidos com o objetivo de representar o seu comportamento mecânico de forma mais realista, como os modelos viscoelásticos e os viscoplásticos.

Este trabalho de dissertação consiste na análise dos modelos existentes de avaliação do comportamento visco-plástico de misturas betuminosas e em avaliar este comportamento através de ensaios apropriados realizados sobre materiais de camada de desgaste e de camada de ligação.

Estes ensaios são especificamente direccionados para os materiais aplicados em Portugal de modo a se obterem dados precisos sobre o comportamento das misturas correntemente utilizadas.

São apresentados dois tipos distintos de ensaio, sendo que no primeiro foram submetidas amostras a cargas repetidas ciclicamente. A este ensaio segue-se a dedução, recorrendo a um programa informático de ajuste de curvas, dos parâmetros teóricos de um modelo selecionado para o efeito.

Para o segundo tipo de ensaio foram levadas até à rotura um determinado número de amostras. Este procedimento permitiu avaliar a variação do valor de resistência das misturas betuminosas quando sujeitas a diferentes condições de velocidade de carga e de temperatura.

Palavras-Chave:. Rodovia, Modelos, Burgers, Misturas Betuminosas, Pavimentos, Comportamento Visco-plástico, Carga Cíclica, Rotura

Assessment of Viscoplastic Behavior of Bituminous Mixtures

Abstract

The bituminous mixtures applied in pavements of transport infrastructure may contribute to the formation of large rut depth that affects the driving conditions due to the great creep deformations that occurs when yield-surface is reached.

Therefore it is essential to carry the study of the behavior of bituminous mixtures. Currently, and due to the fact that these materials present a viscous nature, several models have been developed in order to represent the mechanic behavior in a more realistic way, such as viscoelastic and viscoplastic models.

The present work consists in an analysis of the existent models for the assessment of the viscoplastic behavior of bituminous mixtures, and in evaluating this behavior through appropriate testing carried on materials for surface and binder courses.

This testing is specifically directed to the materials which are applied in Portugal in order to be obtained precise data on the behavior of the mixtures which are commonly used.

Two distinct types of testing are presented, the first of which consists in samples being subjected to repeated cyclic loading. After loading the theoretical parameters of a selected model are extracted, using a curve adjustment software.

Furthermore, a number of mixture samples were subjected to conditions that led to rupture. This test allowed to evaluate the variation of the resistance value of the material when under different conditions.

Keywords: Rut, Models, Burgers, Bituminous Mixtures, Pavements, Viscoplastic Behavior, Cyclic Loading, Rupture

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos e Âmbito do Trabalho.....	4
1.3. Metodologia.....	5
1.4. Organização.....	5
2. Reologia das misturas betuminosas.....	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Modelos Reológicos para Misturas Betuminosas	8
2.2.1. Modelo Elástico-linear.....	8
2.2.2. Modelo de Newton	10
2.2.3. Modelo de Maxwell.....	12
2.2.4. Modelo de Kelvin / Voigt	14
2.2.5. Modelo de Burgers	16
2.3. Importância do Modelo de Burgers para Caracterização da Misturas Betuminosas	21
3. Programa Experimental	23
3.1. Ensaios de Compressão Uniaxial.....	23
3.2. Características das amostras utilizadas.....	28
3.2.1. Betão betuminoso de camada de desgaste	28
3.2.2. Macadame betuminoso de camada de ligação.....	33
3.3. Seleção das amostras.....	36
3.4. Preparação e desenvolvimento do ensaio de compressão uniaxial.....	40
4. Ensaios Cíclicos	43
4.1. Amostras Ensaaiadas	43
4.2. Procedimento	44
4.3. Resultados obtidos	44
4.4. Parâmetros do modelo de Burgers	49
4.5. Comparação do módulo de deformabilidade obtido com métodos analíticos	58
5. Ensaios à Rotura.....	63
5.1. Amostras Ensaaiadas	63
5.2. Procedimento de ensaio.....	66

5.3.	Resultados obtidos	67
5.3.1.	Fendilhação observada.....	67
5.3.2.	Comportamento tensão-deformação	69
5.3.3.	Tensão de rotura	70
6.	Considerações finais	73
6.1.	Conclusões.....	73
6.2.	Perspetivas para desenvolvimentos futuros	74
	Bibliografia.....	75
	Anexos A.1 - Resultados da amostra nº65 da camada de ligação.....	79
	Anexos A.2 - Resultados da amostra nº152 da camada de ligação	85
	Anexos A.3 Resultados da amostra 162 da camada de ligação	91
	Anexos B.1 – Resultados Camada de Ligação	97
	Anexos B.2 - Resultados da Camada de Desgaste	103

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Desenho da estrutura de pavimento rodoviário (InIR, 2012)	1
Figura 1.2 - Esquematização da forma como as rodeiras com origem principal nas camadas betuminosas afetam o pavimento e correspondente perfil de rodeira (Gardete, 2006)	3
Figura 1.3– Imagem de um pavimento com estado avançado de rodeira.....	3
Figura 2.1– Analogia do comportamento elástico linear com o de uma mola elástica que recupera a deformação sofrida depois de descarregada (adaptado de Gardete, 2006 e de Ferreira, 2000).....	9
Figura 2.2-Comportamento do Modelo de Newton (Böhrnsen, 2010)	11
Figura 2.3-Mola e amortecedor em série no modelo de Maxwell (Böhrnsen, 2010).....	12
Figura 2.4-Comportamento do modelo de Maxwell (adaptado de Tanaka, 2003).	14
Figura 2.5-Comportamento do modelo de Kelvin (Freire 2002)	16
Figura 2.6-Modelo de Burgers acima descrito que representa comportamento viscoelástico (Gardete 2006)	17
Figura 2.7- Resposta do modelo de Burgers quando sujeito a um carregamento com tensão constante durante um determinado período de tempo (adaptado de Ferreira, 2000).....	19
Figura 2.8-- Contribuição para a extensão total dos parâmetros do modelo de Burgers (Antes,2003)..	20
Figura 2.9- Modelos Reológicos - Resumo (Quaresma, 2010)	21
Figura 3.1– Exemplo de um ensaio realizado com uma carga aplicada cíclica.....	24
Figura 3.2– Equipamento de teste Zwick/Roell Z050, inserido na câmara climática ZWICK e conectado ao computador que serve de interface.	25
Figura 3.3– Dispositivo da célula de carga do equipamento ZWICK contendo um provete pronto a ser ensaiado.....	26
Figura 3.4– Resultados de dois ensaios cíclicos em que o fenómeno de ajustamento inicial é notório.	27
Figura 3.5– Curva da deformação acumulada obtida através de ensaio uniaxial cíclico, onde são visíveis as três fases descritas (CEN, 2001)	28
Figura 3.6– Curva granulométrica da mistura dos agregados da mistura betuminosa AC 14 surf 35/50 (BB)	30
Figura 3.7– Curva granulométrica da mistura de agregados do AC 20 bin 35/50 (MB)	34
Figura 3.8– Ensaio à compressão uniaxial de amostra A com 5,9cm de altura (45°C)	37
Figura 3.9– Ensaio à compressão uniaxial de amostra B com 5,9 cm de altura (60°C).....	37
Figura 3.10– Consequências da relação altura/diâmetro (h/D) na resistência á compressão de amostras cilíndricas com e sem sistema de redução de atrito (Erkens et al., 2000)	38
Figura 3.11– Ensaio de amostra inteira à compressão uniaxial	39
Figura 3.12– Ensaio de duas metades sobrepostas à compressão uniaxial	40
Figura 3.13–Comparação entre as superfícies de suas amostras, uma não serrada (esquerda) e uma serrada (direita).....	41
Figura 3.14– Comparação de quatro amostras ensaiadas à compressão uniaxial, sendo que na amostra (a) não houve aplicação de sistema de redução de fricção. Neste caso é visível a forma em “barril” do provete em comparação com os outros (Dunhill, 2002)	42
Figura 4.1– Carotes provenientes da camada de ligação AC 20 Bin 35/50 (MB) que forneceram as amostras para este estudo	43
Figura 4.2– Comportamento da amostra nº65 a 35°C e 0,1mm/s	46

Figura 4.3– Comportamento da amostra nº65 a 50°C e 0,1mm/s	46
Figura 4.4– Comportamento da amostra nº65 a 65°C e 0,1mm/s	47
Figura 4.5– Evolução de módulo de deformabilidade E em termos de frequência para a mistura 65 ...	48
Figura 4.6– Evolução de módulo de deformabilidade E em termos de frequência para a mistura 152 .	48
Figura 4.7– Evolução de módulo de deformabilidade E em termos de frequência para a mistura 162 .	49
Figura 4.8– Resultados LabFit para a mistura nº65 a 35°C	50
Figura 4.9– Resultados LabFit para a mistura nº65 a 50°C	50
Figura 4.10– Resultados LabFit para a mistura nº65 a 65°C	51
Figura 4.11– Resultados LabFit para a mistura nº152 a 35°C	51
Figura 4.12– Resultados LabFit para a mistura nº152 a 50°C	51
Figura 4.13– Resultados LabFit para a mistura nº152 a 65°C	52
Figura 4.14– Resultados LabFit para a mistura nº162 a 35°C	52
Figura 4.15– Resultados LabFit para a mistura nº162 a 50°C	52
Figura 4.16– Resultados LabFit para a mistura nº162 a 65°C	53
Figura 4.17– Evolução do parâmetro E1 da mistura nº65 com a temperatura	53
Figura 4.18– Evolução do parâmetro η_1 da mistura nº65 com a temperatura	54
Figura 4.19– Evolução do parâmetro E2 da mistura nº65 com a temperatura	54
Figura 4.20– Evolução do parâmetro η_2 da mistura nº65 com a temperatura	54
Figura 4.21– Evolução do parâmetro E1 da mistura nº152 com a temperatura.....	55
Figura 4.22– Evolução do parâmetro η_1 da mistura nº152 com a temperatura.....	55
Figura 4.23– Evolução do parâmetro E2 da mistura nº152 com a temperatura.....	55
Figura 4.24– Evolução do parâmetro η_2 da mistura nº152 com a temperatura.....	56
Figura 4.25– Evolução do parâmetro E1 da mistura nº162 com a temperatura.....	56
Figura 4.26– Evolução do parâmetro η_1 da mistura nº162 com a temperatura.....	56
Figura 4.27– Evolução do parâmetro E2 da mistura nº162 com a temperatura.....	57
Figura 4.28– Evolução do parâmetro η_2 da mistura nº162 com a temperatura.....	57
Figura 4.29- Relação entre o módulo de deformabilidade da mistura e a rigidez do betume (Lopes 2008)	59
Figura 4.30- Ensaio de anel e bola (Quaresma 2010)	60
Figura 4.31- Ábaco de Van der Poel (Lopes 2008)	61
Figura 4.32- Aplicação de Tensão Constante	62
Figura 5.1- Carotes provenientes da camada de ligação AC 20 bin 35/50 (MB)	66
Figura 5.2- Aspeto da amostra nº251 após ensaio	68
Figura 5.3- Aspeto da amostra nº 254 após ensaio	68
Figura 5.4- Aspeto da amostra nº 354-371 após ensaio	69
Figura 5.5- Comportamento da amostra nº 54 da camada de ligação a 35°C e 0,1mm/s	70
Figura 5.6– Resultados Camada de Ligação	70
Figura 5.7- Resultados Camada de Desgaste.....	71

Índice de Quadros

Quadro 3.1– Composição proposta para a mistura betuminosa aplicada na camada de desgaste	29
Quadro 3.2– Verificação da conformidade das componentes da mistura betuminosa aplicada na camada de desgaste da mistura AC 14 surf 35/50 (BB)	29
Quadro 3.3– Curva granulométrica proposta para a mistura de agregados da mistura AC 14 surf 35/50 (BB)	30
Quadro 3.4– Requisitos/propriedades dos agregados da mistura AC 14 surf 35/50 (BB)	31
Quadro 3.5– Especificações do ligante betuminoso da mistura AC 14 surf 35/50 (BB)	32
Quadro 3.6- Requisitos/Propriedades da Mistura Betuminosa AC 14 surf 35/50 (BB)	32
Quadro 3.7– Composição proposta para a mistura betuminosa aplicada na camada de ligação	33
Quadro 3.8– Verificação da conformidade das componentes da mistura betuminosa aplicada na camada de ligação	33
Quadro 3.9– Curva granulométrica proposta para a mistura de agregados da mistura AC 20 bin 35/50 (MB)	34
Quadro 3.10– Requisitos/propriedades dos agregados da mistura AC 20 bin 35/50 (MB)	35
Quadro 3.11- Requisitos/propriedades da mistura betuminosa AC 20 bin 35/50 (MB)	36
Quadro 4.1– Composição das misturas betuminosas ensaiadas ciclicamente	43
Quadro 4.2- Módulos de deformabilidade (kPa) obtidos para a mistura 65	47
Quadro 4.3- Módulos de deformabilidade (kPa) obtidos para a mistura 152	48
Quadro 4.4- Módulos de deformabilidade (kPa) obtidos para a mistura 162	49
Quadro 5.1 - Composição das misturas betuminosas ensaiadas à rotura – camada de ligação	63
Quadro 5.2– Composição das misturas betuminosas ensaiadas à rotura – camada de desgaste	64
Quadro 5.3– Seleção das amostras ensaiadas à rotura – pares da camada de desgaste	65
Quadro 5.4 - Velocidades e Temperaturas de ensaio de cada amostra	67

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas e siglas

CEN – Comité Europeu de Normalização

InIR – Instituto de Infraestruturas Rodoviárias

IPen – Índice de Penetração

EP - Estradas de Portugal

Símbolos

E – módulo de elasticidade

t - tempo

ε – extensão

•

$\dot{\varepsilon}$ - taxa de variação da extensão

••

$\ddot{\varepsilon}$ - segunda derivada da variação da extensão

η – coeficiente de viscosidade

ν – coeficiente de Poisson

σ – tensão

•

$\dot{\sigma}$ - taxa de variação da tensão de corte

••

$\ddot{\sigma}$ - segunda derivada da variação da tensão de corte

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A principal função de um pavimento, nomeadamente o rodoviário, assim definida pelo Instituto de Infraestruturas rodoviárias (InIR, 2012), é fornecer uma superfície de rolamento livre e desempenada, destinada a permitir a circulação de veículos em adequadas condições de segurança, conforto e economia.

Um pavimento é constituído por várias camadas assentes sobre a fundação, como se esquematiza na Figura 1.1. As camadas superficiais correspondem à camada de desgaste e à camada de ligação. A camada de desgaste ou de rolamento, sendo a camada superior do pavimento, recebe diretamente as ações que decorrem do tráfego e do clima, enquanto que as camadas de fundação fornecem a resistência mecânica necessária para suportar as tensões decorrentes do tráfego.

Entre os diversos tipos de pavimento existentes – pavimentos rígidos, semirrígidos e flexíveis, estes últimos são os que mais usualmente se utilizam na rede rodoviária portuguesa, sendo caracterizados pelo uso de misturas betuminosas nas camadas superiores, e pelo uso de materiais granulares nas camadas subjacentes a estas.

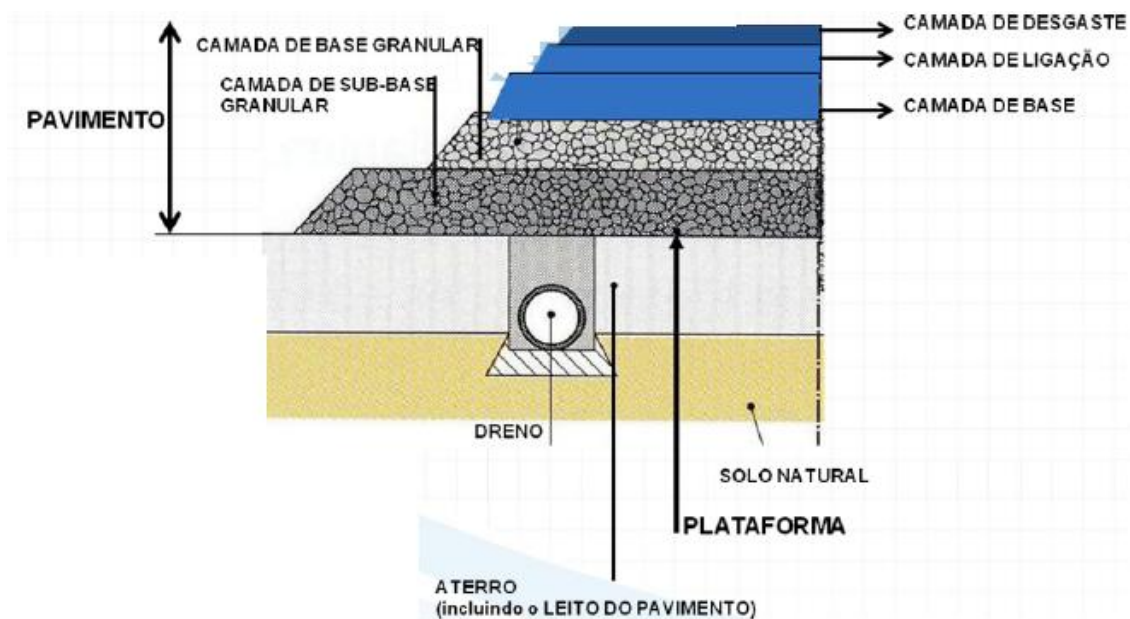


Figura 1.1 - Desenho da estrutura de pavimento rodoviário (InIR, 2012)

Os tipos de degradações em pavimentos rodoviários agrupam-se em diversos tipos (EP, 2008), nomeadamente em deformações, fendilhamento, desagregação da camada de desgaste, e movimento de materiais; sendo que de entre as diversas formas de deformações que podem ocorrer em pavimentos flexíveis, são destacáveis o abatimento, a ondulação, as deformações localizadas e as rodeiras.

De todas estas formas de degradação susceptíveis de afetar o bom comportamento dos pavimentos flexíveis, é a formação de rodeiras porventura a mais gravosa, tanto pelo seu carácter permanente como pelo seu potencial de colocar em perigo os veículos que por elas transitam, não só por este fenómeno gerar depressões que dificultam a progressão normal dos veículos, como pelo facto de as rodeiras interferirem com o escoamento previsto das águas pluviais, aumentando assim o perigo para a ocorrência de fenómenos de hidroplanagem (Soares, 2008).

Para além de dificultar a circulação de veículos em condições de comodidade e segurança, a formação de rodeiras tem um custo económico subjacente, devido aos elevados custos de reparação que daqui decorrem. A formação deste tipo de deformações encontra-se intimamente relacionada com as deformações permanentes que surgem tanto nas camadas do pavimento como no solo de fundação.

As rodeiras ocorrem principalmente por deformação nas camadas betuminosas ou no solo de fundação, sendo que a ocorrência de rodeiras devido ao desgaste e posterior desagregação da camada de desgaste devida à passagem de veículos com correntes de neve é incomum no território nacional. Assim, importa estudar o caso das rodeiras causadas nas camadas betuminosas, que se devem a deformações permanentes que têm origem nas cargas circulantes e em temperaturas elevadas.

Nas Figuras 1.2 e 1.3 esquematiza-se a forma como as rodeiras com origem principal nas camadas betuminosas afetam o pavimento e ilustra-se o correspondente perfil de rodeira.

A deformação permanente nas camadas betuminosas tem origem em vários fatores, entre eles o betume utilizado quando sujeito a temperaturas excessivamente elevadas e velocidades de tráfego reduzidas, o que faz com que estas deformações ocorram com mais frequência em subidas com grande inclinação e cruzamentos, pois é nestes locais que ocorrem frequentemente velocidades de circulação inferiores.

Com o aumento do tráfego de veículos pesados e o consequente aumento da espessura das camadas betuminosas de pavimentos, o problema de formação de rodeiras devido a deformação permanente nestas camadas é o mais preocupante.

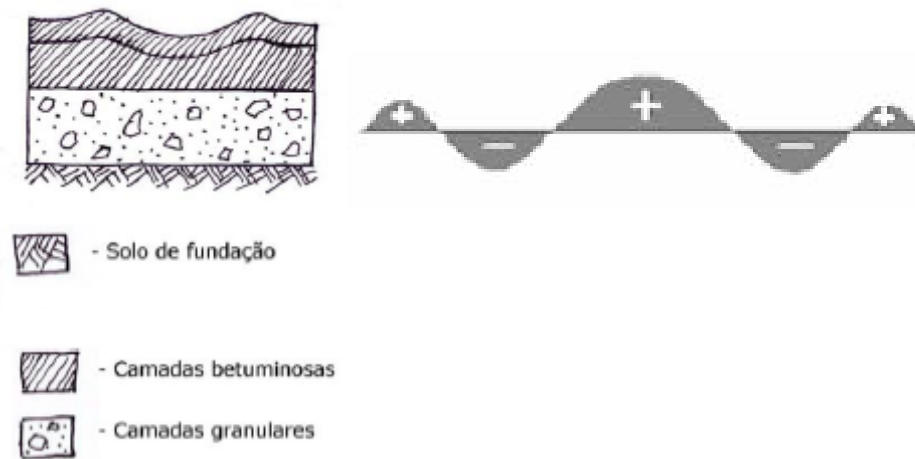


Figura 1.2 - Esquemática da forma como as rodinhas com origem principal nas camadas betuminosas afetam o pavimento e correspondente perfil de rodinha (Gardete, 2006)



Figura 1.3– Imagem de um pavimento com estado avançado de rodinha

Deste modo torna-se essencial proceder ao estudo do comportamento das misturas betuminosas. Atualmente, e atendendo ao facto de estas apresentarem uma natureza viscosa, vários modelos têm sido desenvolvidos com o objetivo de representar o seu comportamento mecânico de forma mais realista, como os modelos viscoelásticos e os viscoplásticos.

Para estas caracterizações interessam particularmente as temperaturas elevadas de serviço, já que é a estas temperaturas que se evidencia a parcela viscosa do comportamento das misturas betuminosas.

1.2. Objetivos e Âmbito do Trabalho

O objetivo base deste trabalho é contribuir para avaliar o comportamento visco-plástico de misturas betuminosas de forma a se obter uma representação precisa do mesmo. Em última análise, este conhecimento servirá para definir os mecanismos de deformação permanente e consequentemente da formação de rodeiras, sendo necessário para a adoção de soluções de pavimento que previnam a formação de rodeiras e os danos daí decorrentes.

A avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas em geral e dos mecanismos que condicionam a deformação dos pavimentos permite a elaboração de métodos de cálculo de previsão de rodeiras (Barrão, 2011) em função da temperatura.

No entanto, verificou-se que nem o trabalho supracitado nem outros conhecidos apresentam estudos de comportamento de misturas betuminosas especificamente direcionados para misturas correntemente aplicadas no território nacional. Este trabalho possui, portanto, o objetivo de colmatar esta falha, efetuando a transição do âmbito do estudo do comportamento de misturas betuminosas em geral para o estudo do comportamento de misturas betuminosas utilizadas em Portugal em particular.

De modo a efetuar este estudo de forma satisfatória foram definidos dois objetivos, concluindo-se o primeiro quando, após definir um modelo de análise adequado ao estudo do comportamento mecânico das misturas, se tiver procedido à análise da variação dos diversos parâmetros que definem o seu comportamento quando sujeitos a diversos fatores externos como carga, temperatura e frequência.

Considerar-se-á satisfeito o segundo objetivo após se ter efetuado o estudo comparativo das condições em que as misturas betuminosas atingem a rotura quando também sujeitas a fatores externos variáveis como carga, temperatura e frequência.

No âmbito deste trabalho foi utilizada um conjunto de amostras de misturas betuminosas provenientes de um pavimento rodoviário construído em Portugal. Deste modo, obtém-se uma base de trabalho adequada para o estudo destes materiais no nosso país.

1.3. Metodologia

Este trabalho iniciou-se com o estudo e análise dos modelos existentes representativos do comportamento das misturas betuminosas, de forma a se proceder à seleção do mais adequado à análise do comportamento das misturas portuguesas.

Para atingir este objetivo procedeu-se ao ensaio em laboratório de um determinado número de amostras de misturas betuminosas extraídas de uma estrada no centro do país. Estas amostras forneceram a base de trabalho para esta dissertação.

Numa primeira fase um dado número de amostras foi ensaiado sendo submetidas a vários ciclos de carga. Estes ensaios foram feitos numa determinada gama de temperaturas (35°C, 50°C, 65°C), e a diferentes frequências de carga.

Com os resultados daqui decorrentes, foram obtidos os diversos módulos de resistência das misturas e, recorrendo a um programa informático de ajuste de curvas, procedeu-se à extração dos parâmetros teóricos do modelo adotado, e daí à sua análise. Como forma de validação dos resultados, recorreu-se ao método Shell para previsão do valor daquele módulo, e da construção da curva mestra para o módulo de rigidez.

Finalmente, como forma de avaliar o comportamento à rotura das misturas betuminosas, procedeu-se ao ensaio das amostras no qual se levaram à rotura. Mais uma vez, estes ensaios foram feitos sujeitando as amostras a diferentes velocidades de aplicação das cargas e diferentes temperaturas.

1.4. Organização

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo o presente o primeiro capítulo, onde se apresenta uma introdução geral e a justificação para a escolha do tema. Este capítulo define ainda os objetivos e o âmbito do trabalho, apresenta a metodologia e explicita a organização do trabalho.

O segundo capítulo denomina-se “Reologia das misturas betuminosas”. Aqui faz-se uma introdução à reologia das misturas betuminosas, apresentando-se uma seleção de modelos de comportamento destas, dos mais simples aos mais complexos. Faz-se uma análise de cada modelo culminando por fim no modelo escolhido para análise do comportamento das misturas portuguesas que consiste na base deste trabalho.

No terceiro capítulo, “Programa Experimental”, faz-se a explicação dos ensaios que foram utilizados neste trabalho para o estudo das misturas betuminosas, bem como das características das amostras utilizadas.

No quarto capítulo são apresentados os resultados provenientes dos ensaios de carregamento cíclico, fazendo-se aqui a extração de dados e a análise dos parâmetros do modelo utilizado e o seu significado. Recorre-se aqui também ao ábaco de Van der Poel e ao método da Universidade de Nottingham como forma de validação dos resultados.

No quinto capítulo são apresentados e analisados os dados resultantes dos ensaios de rotura. É efetuada a sua comparação com alguns dados disponíveis na bibliografia consultada.

O sexto e último capítulo contém as principais conclusões do presente trabalho e recomendações para possíveis desenvolvimentos futuros.

2. Reologia das misturas betuminosas

2.1. Introdução

A reologia é o estudo das propriedades físicas que intervêm no transporte da matéria num fluido, aplicando-se principalmente ao estado líquido dos materiais mas também a sólidos que se encontram em condições tais que quando submetidos a uma força aplicada respondem com um fluxo plástico em vez de se deformarem elasticamente.

Para a caracterização de um fluido denomina-se viscosidade a medida da sua resistência à deformação devido a tensão de corte ou de tração. É definida como a relação entre a tensão de corte e o gradiente de extensão de corte no tempo.

Portanto, quanto mais baixa for a viscosidade de um fluido, mais rápido esse fluido se irá deformar para o mesmo valor de tensão.

Na mecânica contínua, um fluido que exiba uma viscosidade constante para uma mesma temperatura e para gradientes de velocidade de extensão diferentes, denomina-se fluido newtoniano. Deste modo, para este número limitado de fluidos a taxa de deformação é diretamente proporcional à tensão, sendo a viscosidade a constante de proporcionalidade. No entanto, este comportamento não se verifica para a maior parte dos fluidos existentes, os chamados fluidos não-newtonianos.

Para estes casos, não se verifica linearidade na relação entre tensão de corte e a taxa de deformação, havendo portanto uma variação do valor de viscosidade à medida que a tensão de corte a velocidade de deformação se altera.

Deste modo, a reologia debruça-se especialmente sobre os fluidos não-newtonianos, através da caracterização das funções que são necessárias para relacionar tensões com as deformações. Para o caso dos materiais betuminosos, estes tendem a exibir o comportamento de fluidos não-newtonianos, especialmente quando submetidos a altas temperaturas.

Nesta situação, bem como quando submetido a elevadas frequências de carga, o betume tem tendência a se comportar como um sólido elástico; no caso de temperaturas elevadas e baixas frequências de carga, exibe o comportamento de fluido viscoso. Deste modo, torna-se essencial caracterizar a reologia destes materiais aquando do estudo das suas propriedades.

Embora as misturas betuminosas sejam materiais compósitos constituídos por elementos heterogêneos, são passíveis de serem estudadas como se se tratassem de um meio contínuo ou homogêneo, e deste modo, é possível aplicar os conceitos da mecânica contínua acima descritos

ao estudo do seu comportamento, sendo feito uso de modelos reológicos para o relacionamento das tensões com as deformações.

2.2. Modelos Reológicos para Misturas Betuminosas

Nesta secção será feita uma revisão dos aspetos gerais dos principais modelos do comportamento de misturas betuminosas. Estes modelos têm sido propostos para tratar de forma coerente a relação das tensões com as extensões, permitindo simular o comportamento destes materiais quando sob solicitação. Na base da descrição deste comportamento, assim como de todos os problemas físicos, está o estudo das relações entre quantidades físicas como tensão, extensão e tempo.

À medida que a complexidade das misturas em estudo aumenta, para a representação do seu comportamento é necessário fazer uso de modelos mais complexos, que fazem uso de fatores externos importantes como a temperatura, aumentando a qualidade das resposta dos mesmos.

2.2.1. Modelo Elástico-linear

O comportamento elástico é o tipo de comportamento mais simples, servindo por isso de base para todos os modelos mais complexos. Considera-se que um material elástico-linear obedece à Lei de Proporcionalidade de Hooke que relaciona as tensões com as deformações, baseando-se na ideia de que o material se deforma imediatamente com a aplicação do carregamento e retorna à sua situação inicial quando este é removido.

Na sua forma unidimensional a Lei de Hooke é dada pela equação (2.1):

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.1)$$

Em que σ é a tensão, ε a deformação elástica e E é o módulo de elasticidade de Young. Este comportamento é exemplificado na figura 2.1.

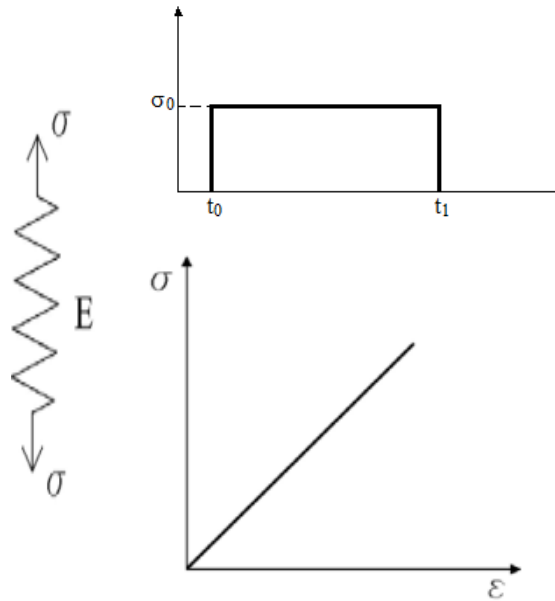


Figura 2.1– Analogia do comportamento elástico linear com o de uma mola elástica que recupera a deformação sofrida depois de descarregada (adaptado de Gardete, 2006 e de Ferreira, 2000)

No caso de corpos tridimensionais esta toma a forma da expressão (2.2):

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (2.2)$$

Em que $\{\sigma\}$ é o vector de tensão, $\{\varepsilon\}$ o vector de extensão, e $[D]$ a matriz constitutiva. No caso de um material isotrópico linear-elástico são necessárias apenas duas constantes elásticas independentes para definir a matriz constitutiva, sendo elas o módulo de elasticidade, E , e o coeficiente de Poisson, ν .

A maior parte dos modelos elásticos assumem à partida comportamento isotrópico para os materiais pois à medida que um material deixa de ser isotrópico e passa a a exibir anisotropia, o número de constantes necessárias para a definição da matriz constitutiva aumenta – chegando a 21 nos casos de materiais completamente anisotrópicos – aumentando a complexidade do problema. A equação (2.3) expõe a matriz constitutiva $[D]$ (Dunhill, 2002).

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ Sym & & & & 0.5-\nu & 0 \\ & & & & & 0.5-\nu \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

O modelo elástico tem a vantagem, para além da simplicidade da sua aplicação, de a maior parte os materiais, incluindo as misturas betuminosas, apresentar comportamento elástico para pequenas deformações.

No entanto, torna-se insuficiente quando é necessário caracterizar a dependência do tempo e da taxa de carregamento no comportamento dos materiais. Como os materiais betuminosas deixam de exibir comportamento elástico a partir de certo nível de deformação, é necessário recorrer a outros modelos.

2.2.2. Modelo de Newton

Outro modelo básico linear é o modelo de Newton, que representa o comportamento viscoso. Este modelo é habitualmente representado por um elemento amortecedor, constituído por um cilindro que contém um líquido no qual se move um êmbolo com um orifício. O líquido passa através deste quando sofre a aplicação de uma força, estando a velocidade da passagem do líquido e logo do movimento do êmbolo diretamente relacionado com a força aplicada.

Conclui-se que o amortecedor segue a lei de Newton, sendo a tensão proporcional à variação de extensão no tempo, como se representa na expressão (2.4):

$$d\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} dt \quad (2.4)$$

Onde a constante η é o coeficiente de viscosidade do amortecedor viscoso linear. Daqui decorre que a relação entre tensão e extensão é dada pela expressão (2.5):

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon} \quad (2.5)$$

Onde $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$. Esta equação estabelece que o grau de variação de extensão $\dot{\varepsilon}$ é proporcional à tensão, o que significa que o amortecedor irá se deformar continuamente de forma constante quando sujeito a uma tensão constante. Se a tensão desaparecer, a deformação continua a existir.

Deste modo, o modelo de Newton pode simular deformação viscosa durante o carregamento mas não é capaz de simular a deformação recuperada após a descarga. Os parâmetros módulo de elasticidade E e viscosidade η são os parâmetros necessários para definir respetivamente o comportamento elástico e o comportamento viscoso. Num material “newtoniano” a extensão em determinado tempo t é dada a partir da expressão (2.6), sendo o referido comportamento ilustrado na figura (2.3):

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\eta} \int_{t_0}^t \sigma(t) dt \quad (2.6)$$

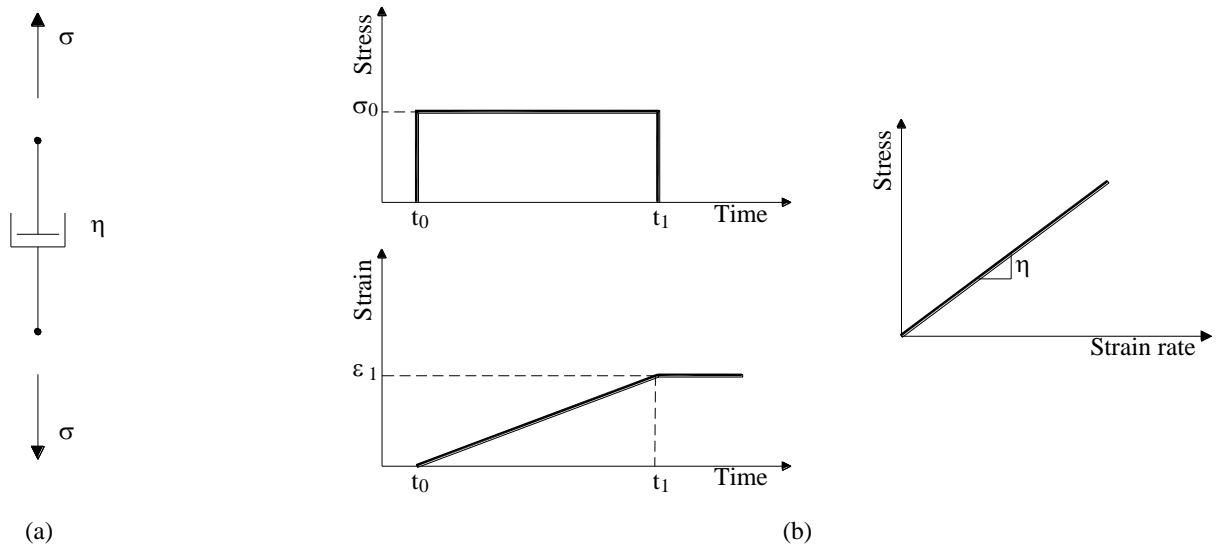


Figura 2.2-Comportamento do Modelo de Newton (Böhrnsen, 2010)

2.2.3. Modelo de Maxwell

Uma maneira de recorrer a modelos mais complexos que os modelos básicos lineares já referidos é realizar associações de modelos simples, já que estes por si só não servem para representar o comportamento viscoelástico. Um dos modelos mais utilizados para caracterizar este comportamento é o modelo de Maxwell, que consiste na associação de mola com amortecedor.

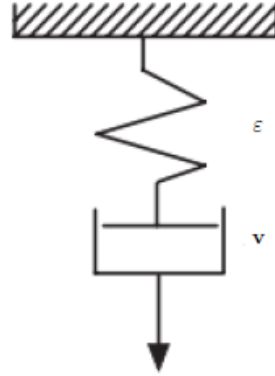


Figura 2.3-Mola e amortecedor em série no modelo de Maxwell (Böhrnsen, 2010)

Este é portanto um modelo de dois elementos que resulta na associação em série de uma mola linear e de um amortecedor viscoso linear, sendo a relação entre extensão total e tensão do sistema representada pela expressão (2.6):

$$\varepsilon = \sigma_0/E_1 + \sigma_0/\eta_1 \times (t_1 - t_0) \quad (2.6)$$

Sendo que o primeiro termo desta equação representa a extensão elástica e que o segundo termo representa a fluência viscosa. Esta equação decorre da já conhecida relação entre tensão e extensão da mola (2.1):

$$\sigma = E\varepsilon_1 \quad (2.1)$$

Em conjunto com a também conhecida relação entre tensão e extensão do amortecedor onde η é o coeficiente de viscosidade e $\dot{\varepsilon}$ é a velocidade de deformação:

$$\dot{\sigma} = \eta \dot{\varepsilon}_2 \quad (2.5)$$

Resultando, pois ambos os elementos estão ligados em série, numa extensão total representada pela expressão (2.7) :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.7)$$

Sendo $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$ e $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$. Se esta equação diferencial for integrada com as condições iniciais $\sigma(t=t_0) = \sigma_0$ e $\dot{\varepsilon}(t) = 0$, o que equivale a dizer que o modelo é sujeito a uma extensão constante, então a tensão irá decrescer e tender para zero. Este é o fenómeno de relaxação de tensão que caracteriza o modelo de Maxwell. Neste modelo a extensão em determinado tempo t pode ser obtida a partir da equação (2.8):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{\eta} \int_{t_0}^t \sigma(t) dt \quad (2.8)$$

A extensão varia de forma constante e a extensão viscosa não é recuperável na descarga. Se assumirmos que o material é forçado a ser sujeito a um alongamento súbito, ou seja em $t = 0$, e que esse alongamento é mantido por um período de tempo, inicialmente esta extensão tem de ser acomodada na sua totalidade pela mola, pelo que a tensão aplicada inicialmente sobe para o nível $\sigma = E\varepsilon_1$. Esta tensão gradualmente irá forçar o amortecedor a agir, aumentando a extensão ε_2 . A força ou tensão da mola irá eventualmente igualar a força ou tensão no amortecedor.

Quando se aplica uma tensão constante $\sigma(t_0, t_1) = \sigma_0$ obtém-se a representação da extensão elástica instantânea, e se acrescentarmos uma tensão constante σ_0 a $t=t_1$, obtemos a fluência viscosa. Conclui-se que segundo este modelo o parâmetro de que depende a deformação permanente é o coeficiente de viscosidade da mola.

Na Figura 2.5 apresenta-se de forma esquemática o comportamento do modelo de Maxwell. No primeiro caso a extensão mantém-se constante e portanto a tensão/força diminui tendendo para zero.

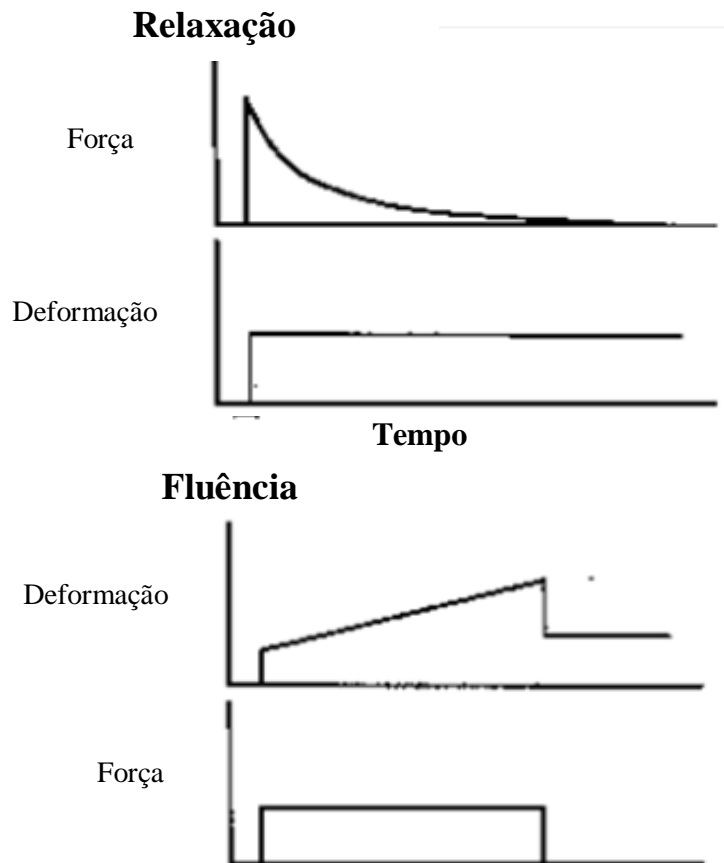


Figura 2.4-Comportamento do modelo de Maxwell (adaptado de Tanaka, 2003).

2.2.4. Modelo de Kelvin / Voigt

Outro modelo constituído por dois elementos incluindo um elemento mola linear e um elemento amortecedor linear (viscoso), que pode ilustrar o comportamento de um sólido visco - elástico é o modelo de Kelvin / Voigt, ou simplesmente modelo de Kelvin, sendo que neste caso os dois elementos encontram-se ligados em paralelo a partir de uma estrutura rígida. Este modelo representa outra opção quando é necessário o aumento de complexidade da caracterização de comportamentos viscoelásticos a partir dos modelos de base.

No modelo de Kelvin os elementos mola e amortecedor vão apresentar a mesma extensão, pois, estando dispostos em paralelo, a tensão aplicada total corresponde à soma das extensões de cada elemento. Do proposto anteriormente sabe-se que a relação entre tensão e extensão da mola é dada pela equação (2.9):

$$\sigma_1 = E\varepsilon \quad (2.9)$$

Sendo que a mesma relação para o amortecedor é dada pela expressão (2.10), onde η é o coeficiente de viscosidade e $\dot{\varepsilon}$ é a velocidade de deformação):

$$\sigma_2 = \eta \dot{\varepsilon} \quad (2.10)$$

Obtendo-se a tensão do total dos elementos ligados em paralelo pela expressão (2.11):

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.11)$$

O que resulta na equação diferencial (2.12) para o modelo de Kelvin:

$$\dot{\varepsilon} + \frac{E}{\eta} \varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.12)$$

Desta maneira é possível deduzir a equação para cálculo da extensão num determinado tempo t quando o sistema está sujeito a uma tensão constante $\sigma(t_0, t_1) = \sigma_0$:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 - e^{-\frac{E}{\eta}(t-t_0)} \right] \quad (2.13)$$

Conclui-se que quando o tempo tende para o infinito, a extensão dirige-se para o valor de:

$$\varepsilon(t = \infty) = \frac{\sigma_0}{E} . \quad (2.14)$$

Na prática, quando a tensão começa a ser aplicada, o elemento viscoso (amortecedor) transmite na totalidade a tensão. À medida que se processa o período de carga, aquele alonga e continuamente transmite uma maior parcela da tensão para o elemento elástico (mola). Chama-se a este fenómeno do modelo de Kelvin “elasticidade retardada”. Este comportamento está exposto na figura 2.6.

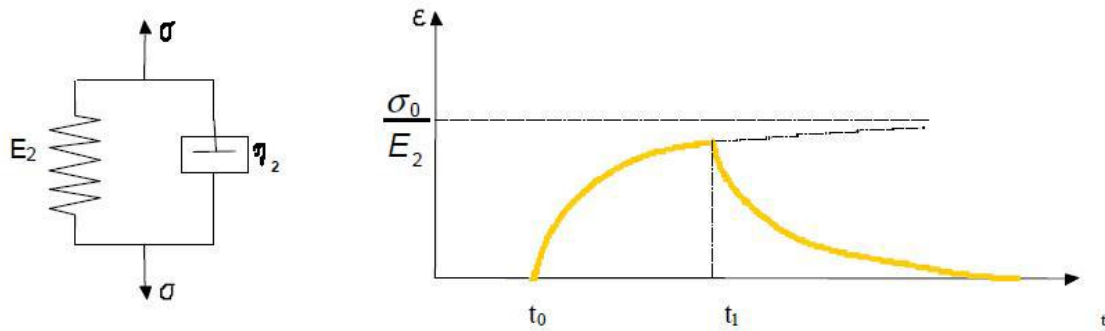


Figura 2.5-Comportamento do modelo de Kelvin (Freire 2002)

Pode-se sumarizar o comportamento viscoelástico representado pelo modelo de Kelvin da seguinte maneira.

Na fase inicial anterior ao carregamento, ambas as componentes do modelo se encontram indeformadas. Durante a fase de carregamento, as duas componentes só podem sofrer deformação em conjunto, ou seja em simultâneo no mesmo valor de extensão, pois encontram-se ligadas pela estrutura rígida. Não é possível deste modo a mola sofrer a deformação imediata que sofreria caso se encontrasse independente ao amortecedor, dado que o seu movimento sofre um atraso devido à presença daquele.

Quando a carga é removida a mola imediatamente revela uma tendência para regressar à sua configuração inicial, revelando recuperação elástica. Esta força ou tendência da mola leva a que ambos os componentes, após um certo período de tempo, regressem às suas posições originais. Embora no limite o modelo acabe por não revelar sinais da deformação, este processo não é imediato devido à presença do amortecedor.

2.2.5. Modelo de Burgers

As seguintes componentes são combinadas em série de modo a analisar a fluência e o comportamento de recuperação da fluência de um material betuminoso, tal como indicado na Figura 2.7: são elas uma mola com módulo de elasticidade E_M , uma mola com módulo de elasticidade E_K e um amortecedor com viscosidade η_K (sendo que estas duas estão colocadas em paralelo) e um amortecedor com viscosidade η_M . Na verdade, este modelo é o resultante da associação em série dos modelos de Maxwell (E_M e η_M) e de Kelvin (E_K e η_K). Este modelo combinado é o que se denomina por “modelo de Burgers”, representado na figura 2.7.

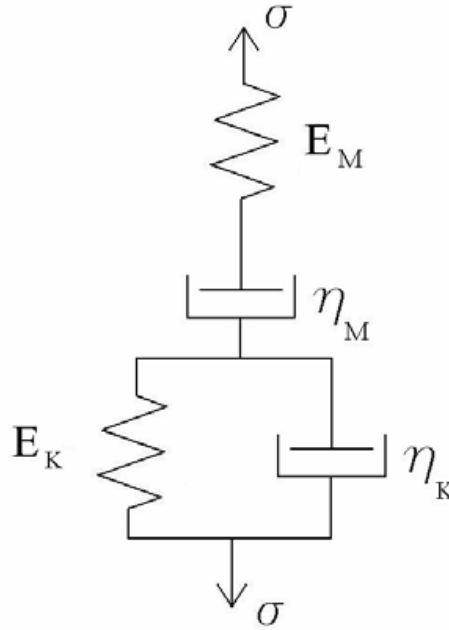


Figura 2.6-Modelo de Burgers acima descrito que representa comportamento viscoelástico (Gardete 2006)

A análise do comportamento de deformação que consta da base do modelo de Burgers é bastante complexa. A extensão total corresponde à soma da extensão na mola e no amortecedor na unidade de Maxwell e na unidade de Kelvin, sendo que tanto a mola e o amortecedor da unidade de Kelvin apresentam a mesma deformação (2.17):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2.15)$$

Neste caso, ε_1 representa a extensão da mola na unidade Maxwell, com

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E} \quad (2.16)$$

ε_2 representa a velocidade de deformação no amortecedor com coeficiente de viscosidade η na unidade Maxwell, com

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\sigma}{\eta_1} \quad (2.17)$$

e ε_3 representa a extensão na unidade de Kelvin podendo-se obter

$$\dot{\varepsilon}_3 + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon_3 = \frac{\sigma}{\eta_2} \quad (2.18)$$

É necessário resolver equações diferenciais de segundo grau usando a tensão de corte, a primeira derivada da tensão de corte em função do tempo $\dot{\sigma}$, que corresponde à velocidade da mudança da tensão de corte, e a segunda derivada da tensão de corte $\ddot{\sigma}$, que corresponde à aceleração, bem como a primeira derivada da deformação em função do tempo $\dot{\varepsilon}$, que corresponde à taxa de deformação, e a segunda derivada $\ddot{\varepsilon}$, que corresponde à aceleração da deformação, sendo obtida a equação diferencial (2.21) para o modelo de Burgers:

$$\eta_2 \ddot{\varepsilon} + E_2 \dot{\varepsilon} = \frac{\eta_2}{E} \ddot{\sigma} + \left(1 + \frac{\eta_2}{\eta_1} + \frac{E_2}{E}\right) \dot{\sigma} + \frac{E_2}{\eta_1} \sigma \quad (2.19)$$

Possuindo um par de condições iniciais é possível obter o valor de extensão num determinado momento t , quando se está na presença de uma tensão constante $\sigma(t_0, t_1) = \sigma_0$, sendo aquelas:

$$\varepsilon(t = t_0) = \varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E} \quad (2.20)$$

$$\dot{\varepsilon}(t = t_0) = \frac{\sigma_0}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_2} \quad (2.21)$$

A resposta do modelo de Burgers que ilustra o comportamento viscoelástico é basicamente dividida em fase de fluência e em fase de recuperação de fluência.

Na primeira fase, quando é aplicada tensão logo no início do ensaio, a mola E_M sofre uma deformação instantânea, seguida de uma deformação com atraso da mola E_k e do amortecedor η_k , e de uma deformação do amortecedor η_M que aumenta continuamente a taxa constante ($d\gamma/dt = \text{cte}$). Após um período de tempo suficientemente longo, a totalidade das molas e dos amortecedores encontra-se deformada até um ponto que é dependente do valor de carga, tempo, e de outras das condições de ensaio.

A segunda fase ocorre quando se retira a tensão aplicada. Esta é caracterizada por uma imediata recuperação instantânea da mola E_M , seguida da recuperação com atraso da mola E_k e

do amortecedor η_k . Neste caso, o amortecedor η_M permanece completamente deformado. Na situação de a amostra regressar na totalidade à sua posição inicial, estamos na presença de um material elástico pelo que o amortecedor η_k não tem significado no modelo de Burgers podendo ser ignorado na análise subsequente.

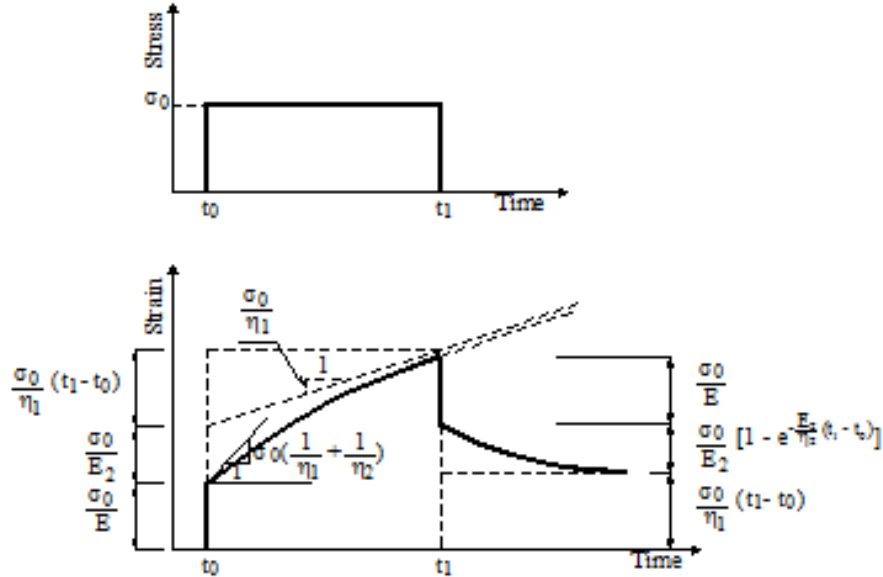


Figura 2.7- Resposta do modelo de Burgers quando sujeito a um carregamento com tensão constante durante um determinado período de tempo (adaptado de Ferreira, 2000).

A Figura 2.8 representa bem este comportamento em que σ_0/E representa a extensão elástica instantânea, enquanto que σ_0/E_2 representa a extensão elástica retardada. e ϵ_p representa a extensão permanente, não recuperável. Esta extensão permanente ou não recuperável é dada pela expressão (2.23) e deve-se à acumulação das extensões viscosas anteriores.

$$\epsilon_p = \frac{\sigma_0}{\eta_M} (t_1 - t_0) \quad (2.22)$$

Pelo que se conclui que esta componente pelo modelo de Burgers é principalmente afetada pelo parâmetro η_M , que determina o valor das deformações irreversíveis (Freire, 2002).

Na Figura 2.9 pode-se observar como os diferentes parâmetros do modelo influenciam as diversas componentes da extensão.

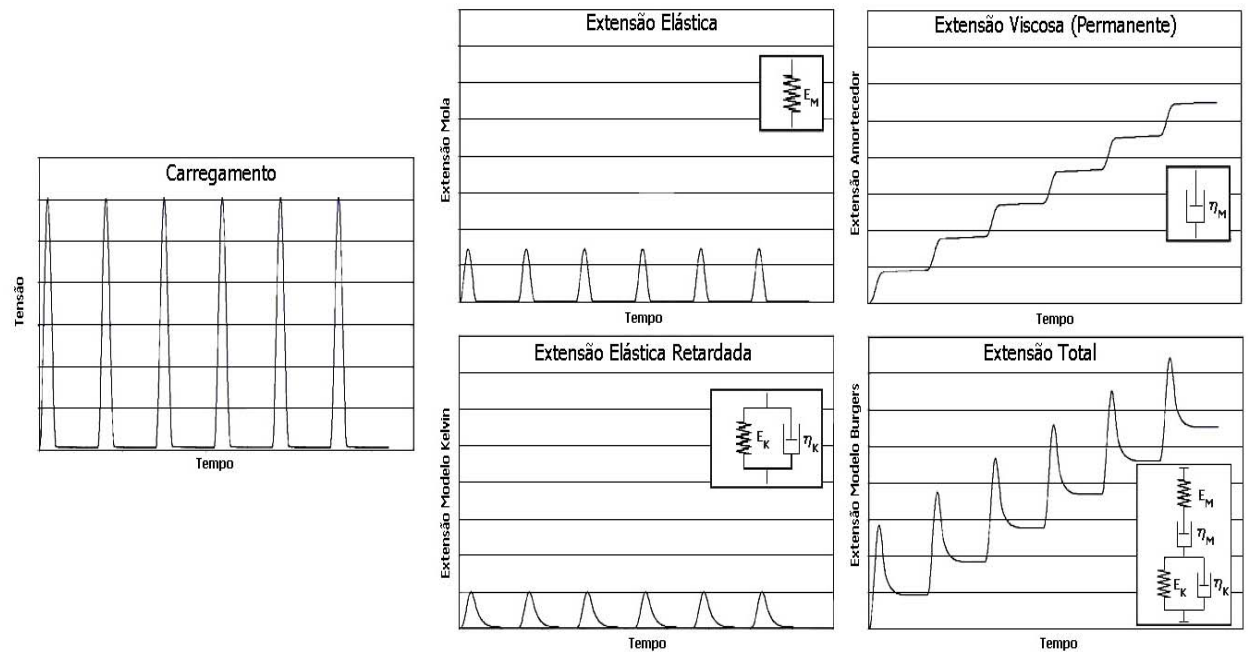


Figura 2.8-- Contribuição para a extensão total dos parâmetros do modelo de Burgers (Antes,2003)

Os parâmetros mecânicos elásticos e plásticos indicados (E_M , E_K , η_M , η_K) são denominadas por parâmetros de Burgers. Estas componentes, que representaremos por E_1 , E_2 , η_1 e η_2 , são necessárias ao modelo de modo a se poder fazer uma análise do comportamento à rotura. Para se levar à sua obtenção deve-se proceder a ensaios laboratoriais extraíndo-se os parâmetros a partir de curvas mestras ou por análise regressiva da curva de resultados fornecidos pela literatura disponível.

2.3. Importância do Modelo de Burgers para Caracterização da Misturas Betuminosas

Nas secções anteriores concluiu-se que modelos de caracterização convencionais baseiam-se na teoria elástica linear e em carregamento estacionário, sendo que um resumo da representação desses modelos está na figura 2.10. No entanto, estes modelos são em princípio considerados inadequados para fazer predições das respostas dos pavimentos reais. Dado que as misturas betuminosas exibem comportamento viscoelástico, e do movimento cíclico das cargas de rodagem, é necessário utilizar modelos reológicos que descrevam as propriedades mecânicas das misturas sendo capazes de representar o material em termos de uma gama de frequências.

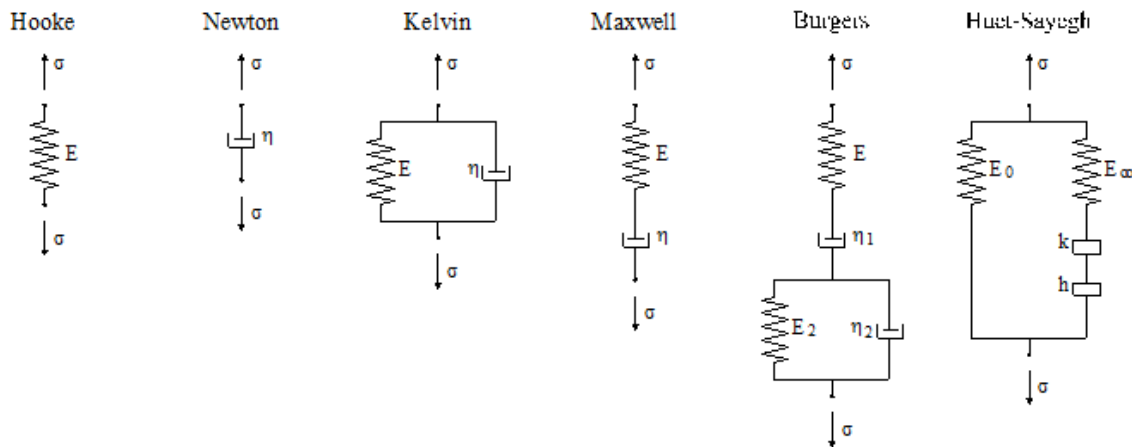


Figura 0.1- Modelos Reológicos - Resumo (Quaresma, 2010)

Vários autores, entre eles Nilsson, Hopman e Isacson (2002) procederam à avaliação do modelo de Burgers, fazendo a caracterização das propriedades viscoelásticas de uma mistura betuminosa a diferentes frequências e temperaturas. Investigou-se e ilustrou-se através de diagramas a capacidade do modelo em descrever dados recolhidos reais, servindo os parâmetros recolhidos para fazer predições do comportamento do pavimento a diferentes temperaturas e velocidades para várias estruturas de pavimento.

Os resultados apresentados nestes trabalhos revelam que o modelo de Burgers é apropriado para descrever as propriedades viscoelásticas. Deste modo, mesmo que para além deste modelo existam outros modelos reológicos, como o de Huet-Sayegh, é o modelo de Burgers o mais utilizado para modelação do comportamento das misturas betuminosas.

De modo a se proceder à determinação dos parâmetros do modelo de Burgers para fazer predições da resposta do pavimento quando submetido a diferentes condições é imprescindível

recorrer a programas informáticos que recorram a métodos como o método dos elementos finitos, o método dos elementos distintos ou o método dos elementos fronteira.

Isto é necessário pois os cálculos necessários para simular a passagem de múltiplos rodados e que permitam simular de forma exata o comportamento influenciado pelas diferentes temperaturas ou velocidades de carregamento tornam-se bastante complexos, sendo a sua execução muito difícil quando não se pode recorrer aquelas ferramentas. Esta disponibilidade tecnológica é uma mais valia do tempo atual, que possibilita igualmente a existência de equipamentos laboratoriais que permitam obter as características das misturas betuminosas necessárias à sua modelação com um grau de confiança bastante elevado, recorrendo a ensaios cada vez mais complexos.

3. Programa Experimental

3.1. Ensaios de Compressão Uniaxial

Um dos ensaios mais utilizados para determinar os parâmetros teóricos dos modelos reológicos utilizados na modelação das misturas betuminosas, como é o caso do modelo de Burgers, é o ensaio de compressão uniaxial. Será este tipo de ensaio que será utilizado no âmbito do presente estudo.

Este ensaio consiste basicamente na aplicação axial de uma carga até a um nível pretendido de tensão, havendo inclusive possibilidade de levar o provete à rotura. Os espécimes ensaiados consistem em amostras cilíndricas provenientes de carotagem efetuada diretamente no pavimento.

As condições gerais do ensaio de compressão uniaxial estão definidas na norma europeia prEN 12697-25 (CEN, 2001), que especifica as características do ensaio. Segundo esta norma o ensaio deverá ser realizado dispensando o recurso a qualquer tipo de tensão de confinamento, embora na prática este confinamento exista no pavimento real. Deste modo, e para ir de encontro á norma, foi decidido submeter as amostras apenas a tensões reais, desprezando aquela componente.

Durante o ensaio é sempre medida a deformação axial do provete, sendo possível também a medição da deformação radial, embora essa componente não tenha sido avaliada no presente trabalho.

São aplicadas cargas crescentes até um determinado ponto, seguidas de uma fase de descarga que consiste simplesmente na retirada da carga. Deste modo, os provetes ensaiados recuperam alguma da deformação sofrida, procedendo-se à análise dos resultados que consistem na curva que representa a deformação axial da amostra em função do tempo ou carga. No entanto, vários autores têm apontado que os valores de módulo de rigidez da mistura betuminosa obtidos desta maneira são geralmente inferiores aos que se recolhem em pistas de ensaios ou pavimentos de serviço (Gardete, 2006).

Esta situação é devida ao efeito dinâmico das cargas aplicadas pela passagem de veículos, que não é passível de ser simulado no ensaio de compressão uniaxial estático. Por outras palavras, considera-se que o ensaio de compressão uniaxial estático não simula a passagem do tráfego, que é uma ação basicamente dinâmica. De modo a ultrapassar esta dificuldade, o equipamento ZWICK oferece a possibilidade de se fazerem ensaios de carregamentos repetidos, definindo as

condições de carregamento como tensão aplicada, velocidade de carregamento e o número de carregamentos. Este tipo de ensaio é em tudo semelhante ao ensaio de compressão estática variando apenas no facto de a aplicação da carga ser cíclica.

Deste modo, para este trabalho e no caso dos ensaios realizados para a análise dos parâmetros do modelo de Burgers, optou-se por submeter os provetes a uma carga aplicada cíclica, de modo a caracterizar o comportamento das misturas quando submetidas a um carregamento repetido, já que esta situação se assemelha à realidade da passagem repetida de veículos num pavimento.

Por razões práticas, que têm a ver com o tempo disponível de ensaio e a preocupação de limitar o dano nas amostras, o número de carregamentos realizado é normalmente reduzido, sendo que para o presente trabalho os resultados foram recolhidos ao final do terceiro ciclo. Em relação ao tempo de carga nos ensaios, este é variável, situando-se também por razões que se prendem com as condicionantes práticas do ensaio aproximadamente entre os 10 e os 170 segundos.

Após cada ciclo de carga-descarga segue-se um período de repouso com duração idêntica ao ciclo, que serve para a amostra efetuar a recuperação de toda a parte reversível da extensão. Na Figura 3.1 apresenta-se em exemplo de um ensaio realizado.

Estes ensaios permitem caracterizar as misturas betuminosas em relação à sua componente mecânica, podendo-se com base nestes resultados proceder à determinação dos parâmetros para modelos matemáticos que permitem a formulação de modelações do comportamento do material.

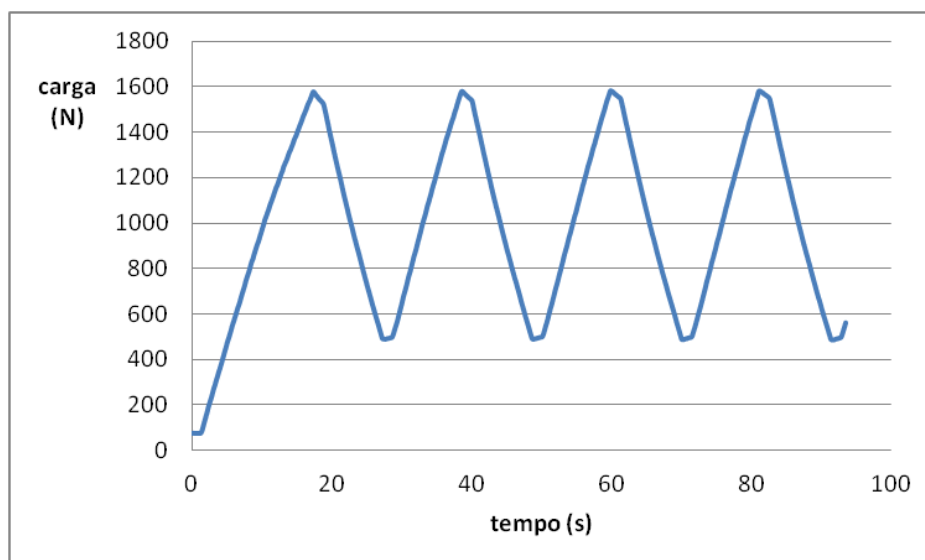


Figura 3.1– Exemplo de um ensaio realizado com uma carga aplicada cíclica

Todos os ensaios foram realizados através da máquina de testes Zwick/Roell Z050 existente no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL. Este equipamento possibilita o encaixe de amostras entre duas bases e a sua compressão, havendo também a possibilidade de efetuar ensaios à tração. A velocidade da carga pode ser regulada havendo desta maneira possibilidade de se fazerem análises a diferentes frequências de carregamento.

Para além disso todos os ensaios foram feitos recorrendo a uma célula de temperatura Zwick, como é ilustrado na Figura 3.2, que consiste numa câmara climática que é fechada mantendo uma pequena abertura que possibilita o carregamento. A câmara permite aquecimento ou refrigeração, estando equipada com sensores de temperatura o que permite proceder a ensaios a temperatura conhecida exata.



Figura 3.2– Equipamento de teste Zwick/Roell Z050, inserido na câmara climática ZWICK e conectado ao computador que serve de interface.

Os valores da deformação recolhidos desta forma servirão primeiramente para a determinação dos módulos de rigidez das misturas. Este módulo é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido, calculando-se a partir do quociente entre a amplitude de tensão a que a amostra está sujeita durante um ciclo e a amplitude de deformação que ocorre durante o ciclo.



Figura 3.3– Dispositivo da célula de carga do equipamento ZWICK contendo um provete pronto a ser ensaiado.

A deformação apresentada pelo provete é automaticamente medida pelo equipamento enquanto que a tensão aplicada é obtida efetuando o quociente entre a carga ou força a que o ensaio é realizado e a área da secção através da qual é exercida a tensão (3.1):

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{F.l_0}{A.\Delta l} \quad (3.1)$$

Na equação acima E representa o módulo de rigidez, em Pa, F representa a força em N, A representa a área em m², Δl é a variação de comprimento do provete em metros, e l_0 é o comprimento inicial deste, também medido em metros.

É sabido que da deformação total experienciada pela amostra sujeita a carregamento uma parte daquela é não recuperável ou irreversível. Como no ensaio cíclico são realizados vários carregamentos, a parcela de deformação permanente é acumulada à medida que o ensaio prossegue. A curva de deformação em relação ao número de carregamentos não é linear, sendo pelo contrário tipicamente constituída por três fases, uma inicial em que, após um aumento

súbito inicial da deformação, a inclinação da curva diminui, ocorrendo na prática uma densificação da mistura. Este comportamento bem como o ajustamento dos pratos da prensa às faces dos provete é responsável pelo fenómeno observado de a deformação total ser superior no primeiro ciclo de carregamento do que nos restantes.

Este comportamento inicial é seguido por uma fase em que a inclinação da curva se torna constante, sendo a deformação permanente desta fase devida a deformações por corte. Na prática esta situação é traduzida na estabilização do valor de deformação permanente após cada carregamento.

Por esta razão considerou-se que para se obter resultados fiáveis os dados para a caracterização mecânica das amostras teriam de ser retirados desta fase. Sendo assim, foi decidido, para minimizar possíveis erros, analisar a resistência daquelas unicamente através da curva de descarga / recuperação do terceiro ciclo de cada ensaio.

Na figura seguinte podem-se observar o resultado de dois ciclos de ensaio em que o fenómeno de ajustamento inicial é notório. Neste caso, para o ensaio a 45°C a amplitude de deformação resultante do primeiro ciclo foi de cerca 0,5mm, enquanto que nos ciclos seguintes foi de cerca de 0,1mm. No caso do ensaio a 60°C, estes valores são respetivamente de 0,7mm e 0,1mm, sendo neste caso visível a progressão do fenómeno inicial até ao quinto carregamento do ensaio.

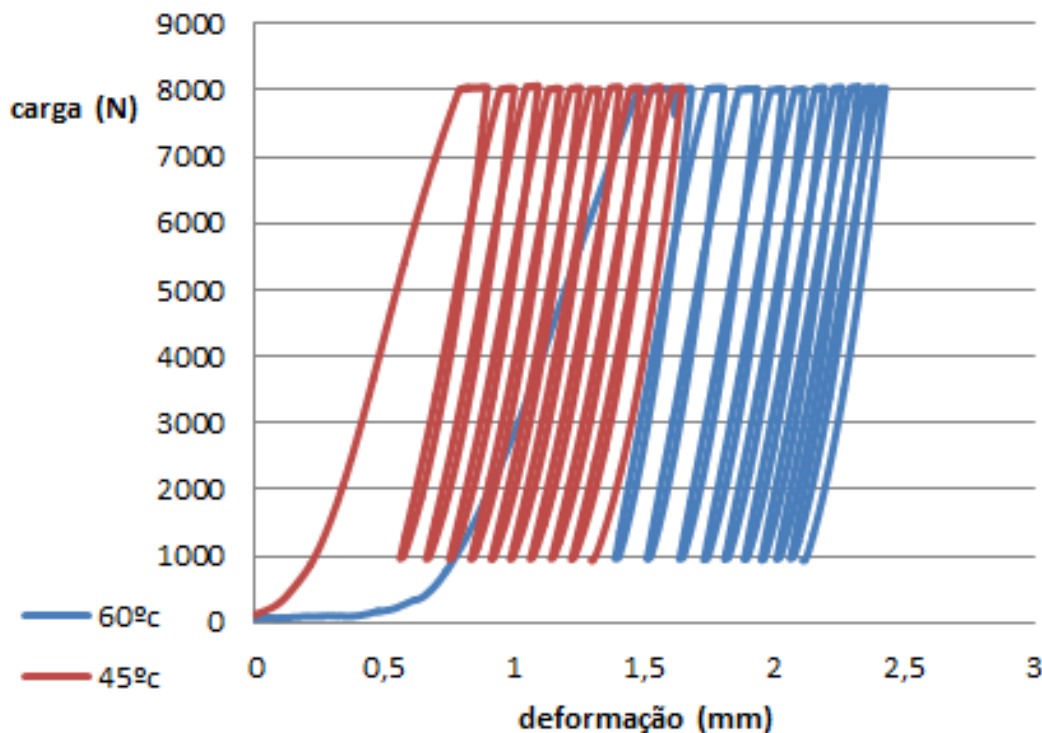


Figura 3.4– Resultados de dois ensaios cíclicos em que o fenómeno de ajustamento inicial é notório.

A última fase típica da curva de evolução da deformação axial permanente acumulada é a fase de rotura. Após um determinado número de carregamentos, que dependerá da resistência do material e das características exteriores ao ensaio, a inclinação da curva sofre um crescimento bastante rápido, atingindo-se o ponto de cedência do provete, como se ilustra na Figura 3.5.

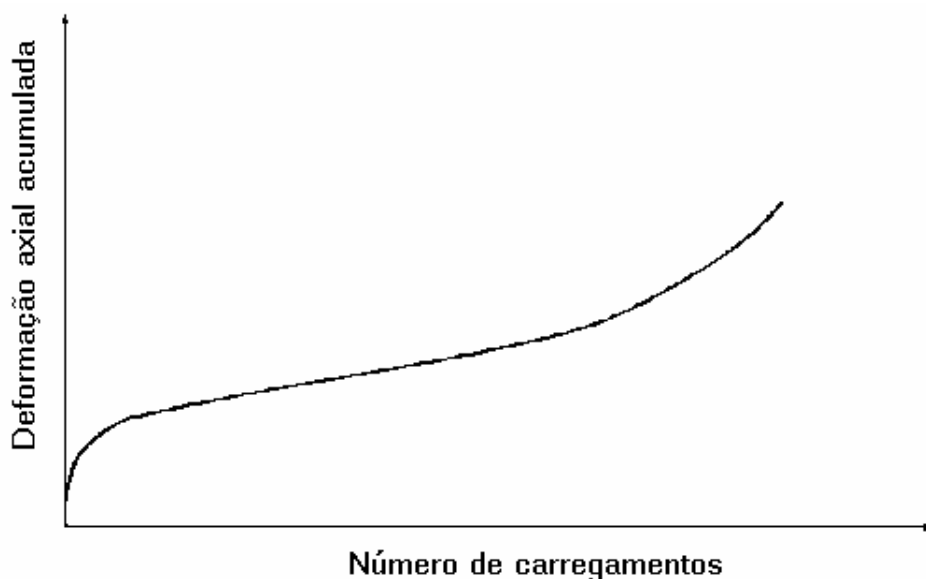


Figura 3.5– Curva da deformação acumulada obtida através de ensaio uniaxial cíclico, onde são visíveis as três fases descritas (CEN, 2001)

3.2. Características das amostras utilizadas

Para ser realizado este estudo foram analisadas amostras de misturas betuminosas provenientes de duas camadas de uma mesma estrada – camada de desgaste e camada de ligação. Todas as amostras são provenientes da Subconcessão do Pinhal Interior no lanço Sertã/Oleiros.

3.2.1. Betão betuminoso de camada de desgaste

A camada de desgaste é um betão betuminoso de utilização tradicional em Portugal que tem um agregado com dimensão nominal máxima de 14 mm e utilização de um betume do tipo 35/50. O tipo de mistura betuminosa utilizado tem a designação “AC 14 surf 35/50 (BB)”. A espessura desta camada é tipicamente reduzida, apresentando valores entre 4 e 6 cm.

Este material foi fabricado pela empresa Mota-Engil e a fórmula de trabalho utilizada é a que se segue no quadro 3.1:

Quadro 3.1– Composição proposta para a mistura betuminosa aplicada na camada de desgaste

DESIGNAÇÃO	PROVENIÊNCIA	NATUREZA	%
Brita 4/16	Pedreira de Castelo de Vide - Lena Agregados	Granito	37,0
Brita 2/6.3			18,0
Pó (0/4)		Granito	37,0
Filer	Vale da Pedreira	Calcário	1,0
Betume 35/50	Cepsa	-	4,7

A verificação de conformidade foi efetuada cumprindo as normas apropriadas presentes no quadro 3.2:

Quadro 3.2– Verificação da conformidade das componentes da mistura betuminosa aplicada na camada de desgaste da mistura AC 14 surf 35/50 (BB)

CONDIÇÃO		
Material	NORMA A CUMPRIR	CERTIFICADO de ACORDO C/:
Agregados para Misturas Betuminosas		
Brita 4/16	EN 13043:2002	NP EN 13043:2004 (1592-CPD-0409)
Brita 2/6.3		NP EN 13043:2004 (1592-CPD-0409)
Pó (0/4)		NP EN 13043:2004 (1592-CPD-0409)
Agregados para Misturas Betuminosas		
Brita 4/16	Base para a Marcação CE	Declaração de Conformidade pelo fabricante, com base num certificado de conformidade do controlo interno da produção
Brita 2/6.3		
Pó (0/4)		
Mistura Betuminosa		
AC 14 surf 35/50 (BB)	EN 13108-1:2006	-
Betume		
Cepsa 35/50	EN 12591:2009	EN 12591:2009
	Marcação CE (EN 13108-1)	-

Foi definido que a mistura de agregados deveria cumprir o fuso granulométrico indicado no Quadro 3.3, podendo-se comparar com o que foi obtido após o fabrico.

Quadro 3.3– Curva granulométrica proposta para a mistura de agregados da mistura AC 14 surf 35/50 (BB)

DISPOSIÇÃO	CONDIÇÃO		
	PRECONIZADA	MATERIAL PROPOSTO	

Abertura das malhas dos peneiros ASTM (mm)	% Passados		
	Lim. Inf	Lim. Sup.	Curva Estudo
20,00 mm	100	100	100
14,00 mm	90	100	94
10,00 mm	67	77	73
4,00 mm	40	52	42
2,00 mm	25	40	31
0,500 mm	11	19	18
0,125 mm	6	10	9
0,063 mm	5	8	5,7

- A curva granulométrica dentro dos limites especificados apresentará, ainda, uma forma regular.	ver gráfico
--	-------------

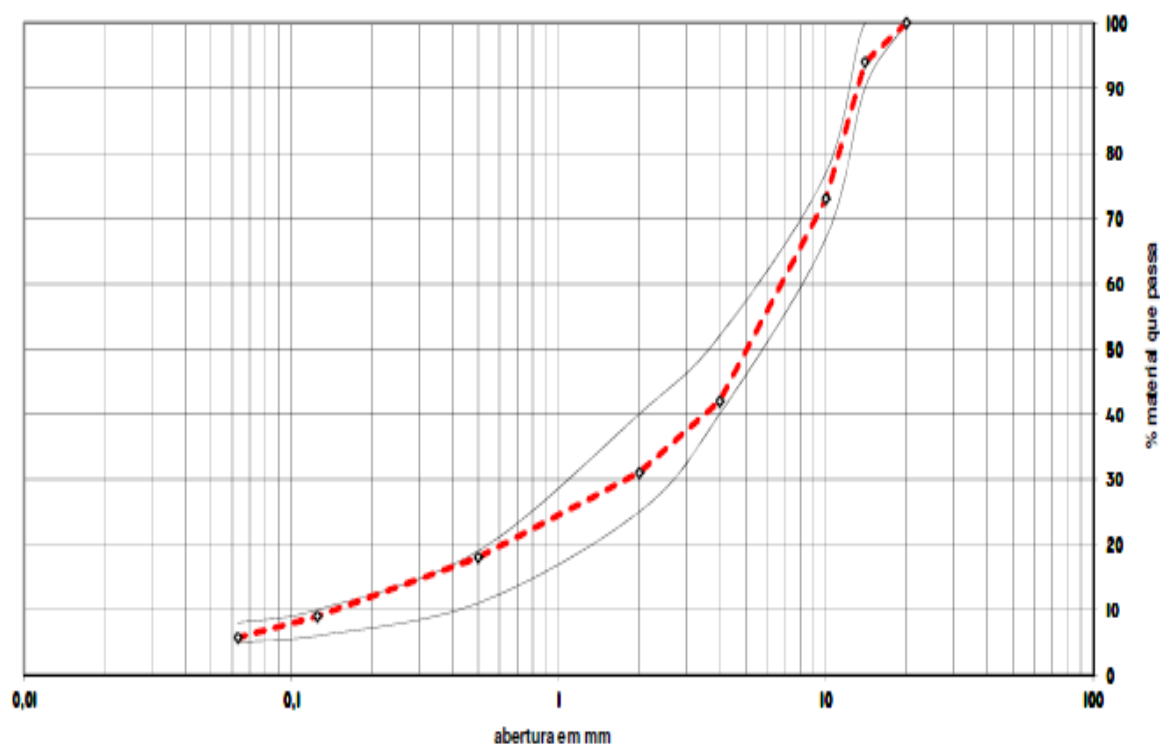


Figura 3.6– Curva granulométrica da mistura dos agregados da mistura betuminosa AC 14 surf 35/50 (BB)

No Quadro 3.4 podem-se comparar os requisitos assumidos para os agregados com as propriedades obtidas após fabrico.

Quadro 3.4– Requisitos/propriedades dos agregados da mistura AC 14 surf 35/50 (BB)

REQUISITOS / PROPRIEDADES	CONDIÇÃO		
	PRECONIZADA	MATERIAL PROPOSTO	
- Qualidade dos finos — 3% - 10%	$MB_F 10$	$MB_F 10$	
	(a)	NA	
- Forma do agregado grosso Índice de Achatamento	FI_{20}	FI_{20}	Brita 4/16
		FI_{20}	Brita 2/6.3
- Percentagens de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	Brita 4/16
	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	Brita 2/6.3
- Resistência à fragmentação do agregado grosso (Coeficiente Los Angeles)	$LA_{20} / *LA_{30} \text{ (granitóides)}$	LA_{30}	Brita 4/16
		LA_{30}	Brita 2/6.3
- Resistência ao Desgaste por Atrito do agregado grosso (Coeficiente micro-Deval)	$M_{DE 15}$	$M_{DE 15}$	Brita 4/16
		$M_{DE 15}$	Brita 2/6.3
- Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste	$PSV_{50} (\geq 50\%)$	52%	Brita 4/16
		52%	Brita 2/6.3
- Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes	1%	0,80%	Brita 4/16
		1,10%	Brita 2/6.3
		0,50%	Pó (0/4)
- Resistência ao Gelo e ao Degelo	Se $W_A > 2$, o valor do sulfato de magnésio enquadrado em MS_{35}	-	Brita 4/16
		-	Brita 2/6.3
		-	Pó (0/4)

Em relação ao ligante betuminoso utilizado, que é o betume 35/50, as suas especificações encontram-se no Quadro 3.5. Este ligante foi utilizado em ambas as misturas betuminosas em causa.

Quadro 3.5– Especificações do ligante betuminoso da mistura AC 14 surf 35/50 (BB)

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	NORMA	MIN.	MAX.
Penetração (25°C)	0,1 mm	EN 1426	35	50
Índice de penetração	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	50	58
Ponto de fragilidade Fraass	°C	EN 12593	-	-5
Solubilidade	%	EN 12592	99,0	-
Ponto de inflamação	°C	EN ISO 2592	240	-
Resistência ao endurecimento a 163°C (EN 12607-1)				
Variação de massa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetração retida	%	EN 1426	53	-
Δ Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	11

Em relação à mistura betuminosa, o justificativo da análise de conformidade é o que se apresenta no Quadro 3.6.

Quadro 3.6- Requisitos/Propriedades da Mistura Betuminosa AC 14 surf 35/50 (BB)

DISPOSIÇÃO	CONDIÇÃO	
	PRECONIZADA	MATERIAL PROPOSTO
Para a percentagem de betume definida no estudo de formulação de: 5,0%		
	Lim. Inf.	Lim. Sup.
- Número de pancadas	75	75
- Força de Rotura	S _{min} 7,5	S _{max} 21
- Deformação	F 2	F 4
- Quociente Marshall	Q _{min} 3	-
- Vazios na Mistura de Agregados (VMA)	VMA _{min} 14	-
- Porosidade (Vm)	V _{min} 3,0	V _{max} 5
- Índice de Resistência Conservada	80%	-
- Percentagem de Ligante	B _{min} 4,0	-

3.2.2. Macadame betuminoso de camada de ligação

A camada de ligação foi realizada com uma mistura betuminosa que é designada por “AC20 bin (MB)”, tratando-se de um macadame betuminoso em que o agregado tem uma dimensão nominal máxima de 20mm. Este material apresenta espessuras superiores de aplicação, da ordem de 7 a 12 cm.

Esta mistura betuminosa teve a mesma origem que a anterior e a fórmula de trabalho proposta é a que se indica no Quadro 3.7

Quadro 3.7– Composição proposta para a mistura betuminosa aplicada na camada de ligação

DESIGNAÇÃO	PROVENIÊNCIA	NATUREZA	%
Brita-2/6,3mm	Lena Agregados	Granito	9,6
Brita-5.6/16mm	Lena Agregados	Granito	33,4
Brita-16/22,4mm	Lena Agregados	Granito	14,3
Pó 0/4mm	Lena Agregados	Granito	38,2
Betume 35/50	Cepssa	-	4,5

A verificação de conformidade foi efetuada cumprindo as normas apropriadas que são indicadas no Quadro 3.8.

Quadro 3.8– Verificação da conformidade das componentes da mistura betuminosa aplicada na camada de ligação

CONDIÇÃO		
Material	NORMA A CUMPRIR	CERTIFICADO de ACORDO C/:
Agregados para Misturas Betuminosas		
Brita-2/6,3mm	NP EN 13043:2004	NP EN 13043:2004 /AC:2010
Brita-5.6/16mm		NP EN 13043:2004 /AC:2010
Brita-16/22,4mm		NP EN 13043:2004 /AC:2010
Pó 0/4mm		NP EN 13043:2004 /AC:2010
Agregados para Misturas Betuminosas		
Brita-2/6,3mm	Base para a Marcação CE	Declaração de Conformidade pelo fabricante, com base num certificado de conformidade do controlo interno da produção
Brita-5.6/16mm		
Brita-16/22,4mm		
Pó 0/4mm		
Mistura Betuminosa		
AC 20 Bin 35/50	EN 13108-1:2006	-
Betume		
Cepssa	EN 12591:2009	EN 12591:2009
	Marcação CE (EN 13108-1)	-

A mistura de agregados deveria cumprir o fuso granulométrico indicado no Quadro 3.9, tendo sido selecionada uma mistura de agregados com a curva granulométrica que é indicada no mesmo Quadro.

Quadro 3.9– Curva granulométrica proposta para a mistura de agregados da mistura AC 20 bin 35/50 (MB)

DISPOSIÇÃO	CONDIÇÃO	
	PRECONIZADA	MATERIAL PROPOSTO

Abertura das malhas dos peneiros (mm)	% Passados		
	Lim. Inf	Lim. Sup.	Curva Estudo
31,50 mm	100	100	100
20,00 mm	90	100	98
12,50 mm	57	86	78
4,00 mm	34	49	42
2,00 mm	26	41	36
0,500 mm	12	26	20
0,125 mm	4	14	7
0,063 mm	2	7	4,4

- A curva granulométrica dentro dos limites especificados apresentará, ainda, uma forma regular.	ver gráfico
--	-------------

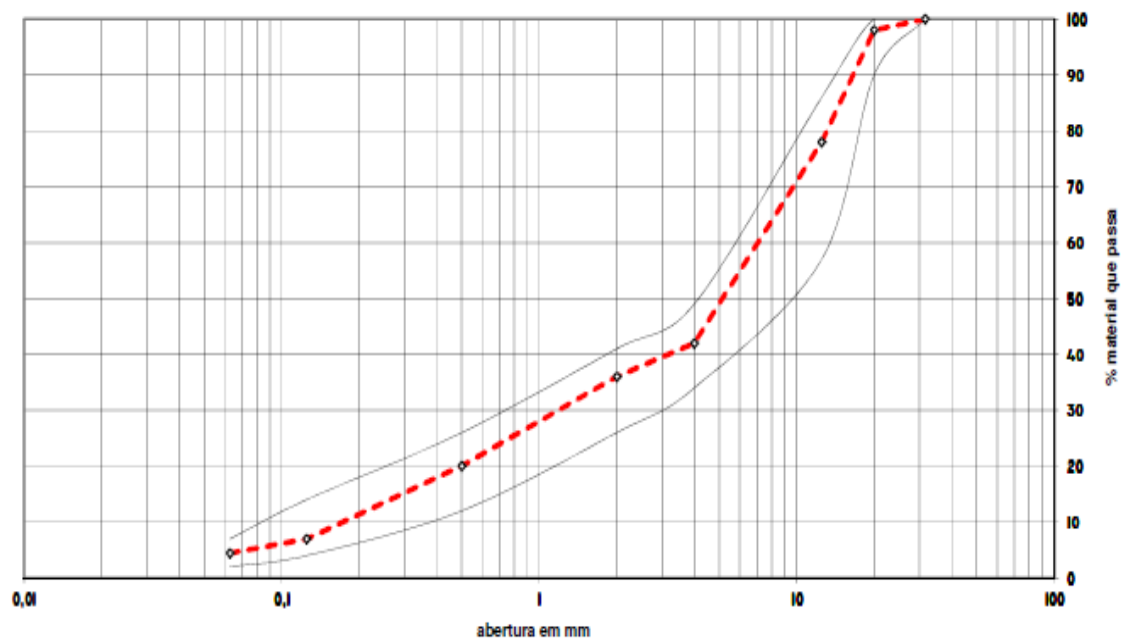


Figura 3.7– Curva granulométrica da mistura de agregados do AC 20 bin 35/50 (MB)

No Quadro 3.10 é possível comparar os requisitos assumidos para os agregados bem como as propriedades obtidas após fabrico.

Quadro 3.10– Requisitos/propriedades dos agregados da mistura AC 20 bin 35/50 (MB)

REQUISITOS / PROPRIEDADES	CONDIÇÃO	
	PRECONIZADA	MATERIAL PROPOSTO
- Qualidade dos finos — 3% - 10%	$MB_F 10$	$MB_F 10$
	(a)	NA
- Forma do agregado grosso Índice de Achatamento	FI_{30}	FI_{25} Brita-2/6,3mm
		FI_{25} Brita-5.6/16mm
		FI_{25} Brita-16/22,4mm
- Percentagens de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$ Brita-2/6,3mm
		$C_{100/0}$ Brita-5.6/16mm
		$C_{100/0}$ Brita-16/22,4mm
- Resistência à fragmentação do agregado grosso (Coeficiente Los Angeles)	LA_{35}	LA_{35} Brita-2/6,3mm
		LA_{35} Brita-5.6/16mm
		LA_{35} Brita-16/22,4mm
- Resistência ao Desgaste por Atrito do agregado grosso (Coeficiente micro-Deval)	M_{DE20}	M_{DE20} Brita-2/6,3mm
		M_{DE20} Brita-5.6/16mm
		M_{DE20} Brita-16/22,4mm
- Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes	2%	1,20% Brita-2/6,3mm
		0,80% Brita-5.6/16mm
		0,70% Brita-16/22,4mm
		1,10% Pó 0/4mm
- Resistência ao Gelo e ao Degelo (d)	Se $W_{cm} > 0,5$, o valor do sulfato de magnésio deve estar enquadrado em MS35	- Brita 1- 6/11 mm
		- Brita 2- 11/22 mm
		- Pó 0/4mm
		- Filer

Finalmente, em relação à própria mistura betuminosa, o justificativo da análise de conformidade é o indicado no Quadro 3.11.

Quadro 3.11- Requisitos/propriedades da mistura betuminosa AC 20 bin 35/50 (MB)

DISPOSIÇÃO	CONDIÇÃO		MATERIAL PROPOSTO
	PRECONIZADA		
Para a percentagem de betume definida no estudo de formulação de:			4,5%
	Lim. Inf.	Lim. Sup.	
- Número de pancadas	75		75
- Força de Rotura	$S_{min} 7,5$	$S_{max} 21$	20,0 KN
- Deformação	F 2	F 4	3,0 mm
- Quociente Marshall	$Q_{min} 2$	-	6,6
- Vazios na Mistura de Agregados (VMA)	$VMA_{min} 14$	-	16,0%
- Porosidade (Vm)	$V_{min} 3,0$	$V_{max} 6$	5,6%
- Índice de Resistência Conservada	80%	-	93%
- Percentagem de Ligante	$B_{min} 3,5$	-	4,5%

3.3. Seleção das amostras

As amostras utilizadas neste estudo consistem em provetes cilíndricos, cada um com diâmetro de 10cm, e altura variável. A forma cilíndrica das amostras é essencial para o estudo, pois sendo a resposta dos materiais dependente da carga aplicada, é necessário que a distribuição desta nas amostras quando ensaiadas seja uniforme, vantagem fornecida pela forma cilíndrica.

Em relação à altura de cada amostra, verificou-se que esta é bastante variável, não tendo sido possível recorrer a um grupo de amostras com exatamente as mesmas dimensões. Verifica-se no entanto que cada grupo de amostras possui dimensões semelhantes entre si, sendo que as amostras provenientes da camada de desgaste são em geral com menor altura que as amostras correspondentes à camada de ligação. Este facto deve-se às diferenças de espessura características de cada camada.

Os efeitos da relação entre altura e diâmetro de amostras cilíndricas quando sujeitas a compressão já foram investigados por vários autores. Segundo Erkens (2000), valores baixos desta relação tendem a conduzir ao denominado efeito de fronteira, que causa um aparente aumento da resistência à compressão das misturas, o que pode resultar numa sobre estimativa da resistência do material que está a ser testado.

Nas Figuras 3.8 e 3.9 podem-se observar os resultados de dois ensaios à compressão uniaxial de duas amostras ambas com 5,9 cm de altura e 10cm de diâmetro, efetuada a 45°C (Figura 3.8) e a 60°C (Figura 3.9).. Observa-se que, devido ao facto da relação altura/diâmetro ser bastante baixa (0,59), o valor de tensão aplicada aumenta indefinidamente não sendo possível definir o ponto de rotura do material, consequência do “efeito de fronteira”.

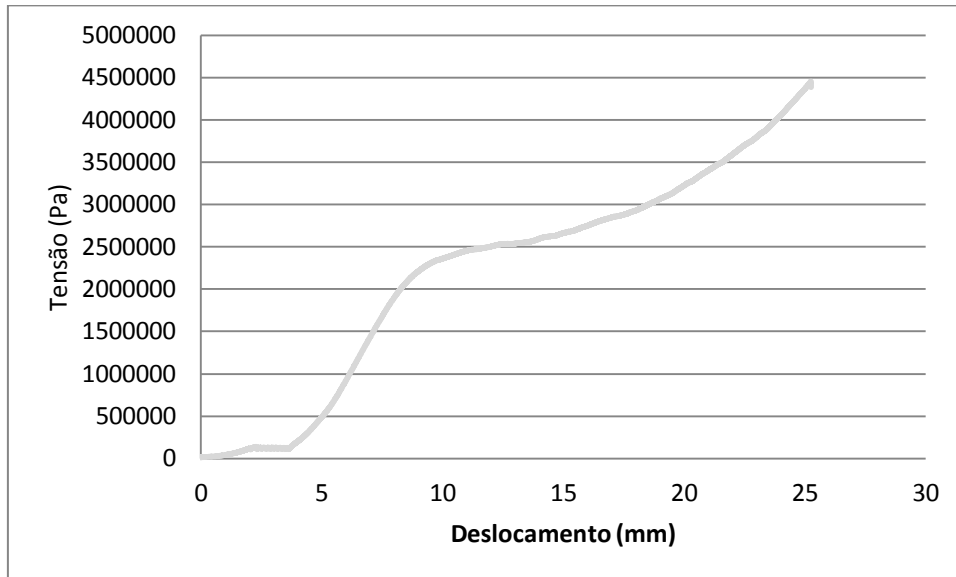


Figura 3.8– Ensaio à compressão uniaxial de amostra A com 5,9cm de altura (45°c)

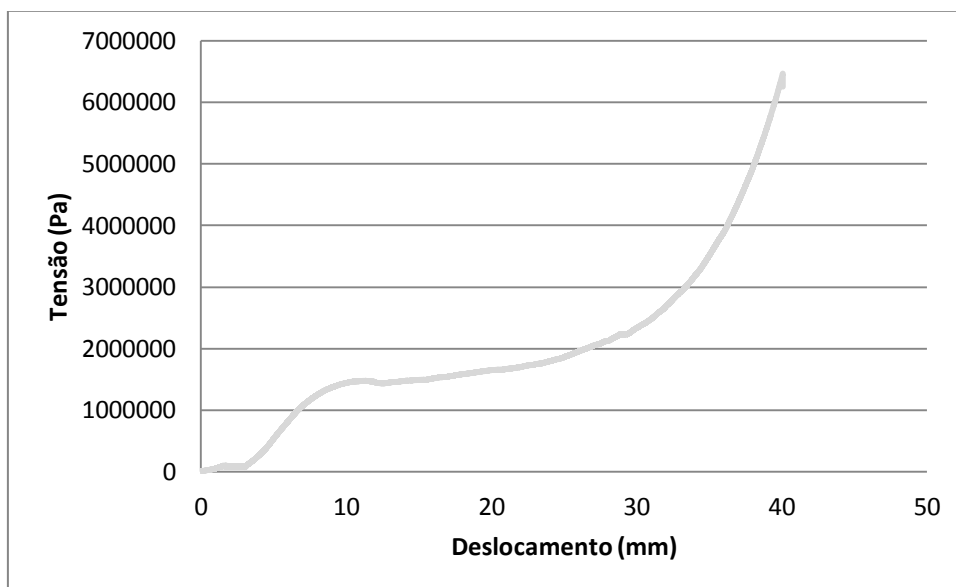


Figura 3.9– Ensaio à compressão uniaxial de amostra B com 5,9 cm de altura (60°c)

De modo a evitar este efeito no caso de ensaios sem nenhum sistema de redução de atrito, é necessário o uso de amostras cuja altura corresponda no mínimo ao dobro do diâmetro

(altura/diâmetro ≥ 2), sendo suficiente nos casos de ensaios com sistema de redução de atrito garantir uma relação de altura/diâmetro igual a 0,5, como é patente na figura 3.10 (Erkens et al, 2000).

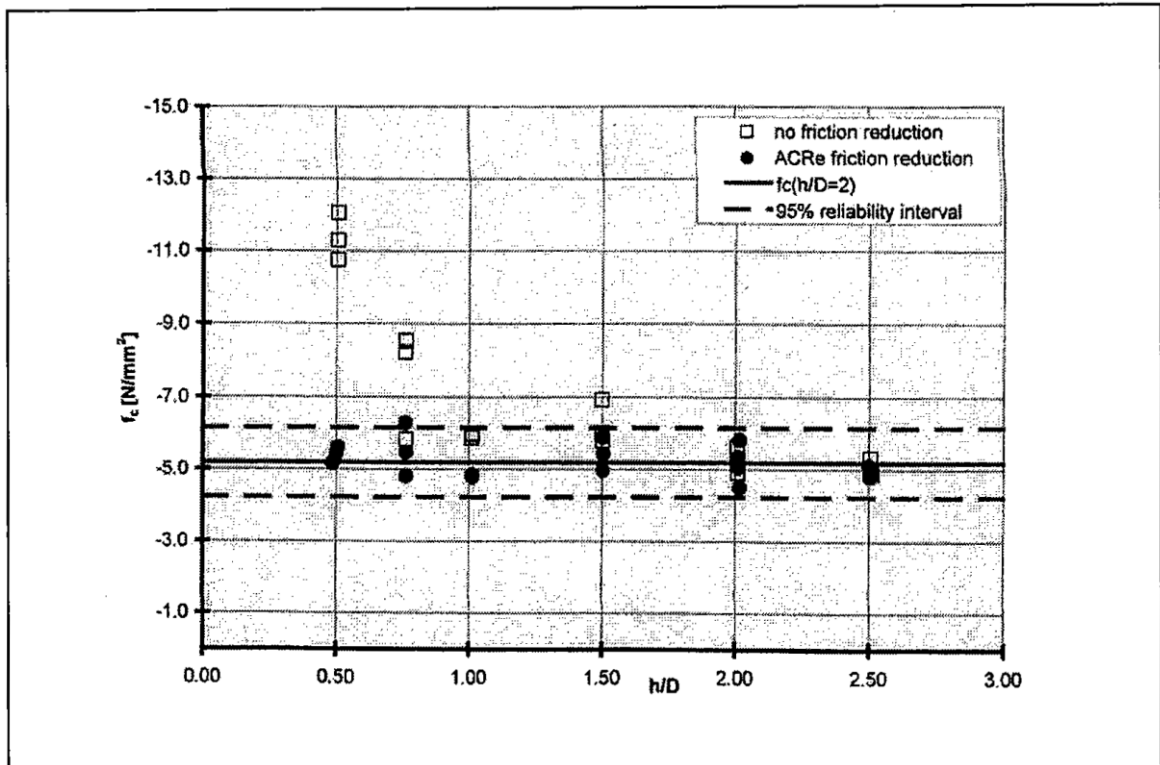


Figura 3.10– Consequências da relação altura/diâmetro (h/D) na resistência á compressão de amostras cilíndricas com e sem sistema de redução de atrito (Erkens et al., 2000)

No caso das amostras utilizadas neste estudo, verificou-se que a altura média dos espécimes provenientes da camada de ligação é de 8.8 cm, o que resulta numa relação altura/diâmetro de 0,88, o que, em conjunto com o uso de um sistema de redução de atrito, foi considerado aceitável. No caso das amostras provenientes da camada de desgaste, o facto de estas serem bastante mais pequenas, com uma média de altura de 5,2 cm, levou a que se providenciasse uma solução alternativa de modo a evitar o efeito de fronteira.

Deste modo, estas amostras foram ensaiadas aos pares, com um espécime sobreposto ao outro, o que devido ao facto de as amostras assentarem perfeitamente uma noutra permite que para todos os efeitos as tensões são uniformemente transmitidas e aquelas atuem como se de um só corpo de tratassem. Foram escolhidas para cada par espécimes com valor de densidade semelhante, de modo a obter um sistema o mais homogéneo possível.

Os dois gráficos seguintes ilustram os resultados provenientes de a mesma amostra submetida a dois ensaios de um único ciclo à compressão uniaxial. No primeiro caso a amostra foi comprimida inteira, possuindo altura total de 11,5cm. Posteriormente a amostra foi cortada em duas metades semelhantes entre si, sendo estas submetidas ao mesmo ensaio sobrepostas em conjunto. Neste caso, a metade superior com 6,1cm de altura e a inferior com 5,4cm de altura. Ambos os ensaios foram realizados a 45°C a uma velocidade de carga de 0,5mm/min. Como se verifica os resultados são muito semelhantes, podendo-se admitir que quando duas metades sobrepostas são ensaiadas em conjunto estas atuam como um único corpo.

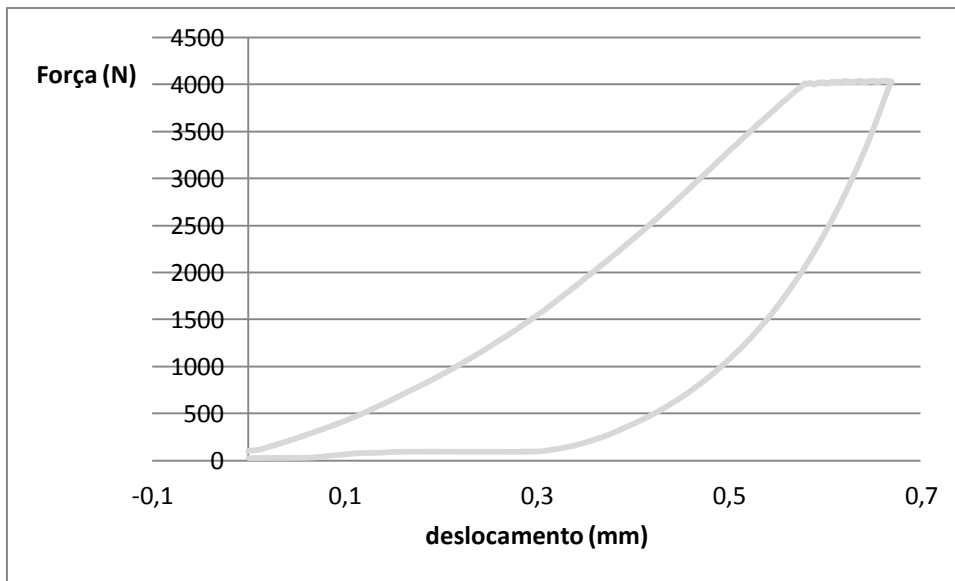


Figura 3.11– Ensaio de amostra inteira à compressão uniaxial

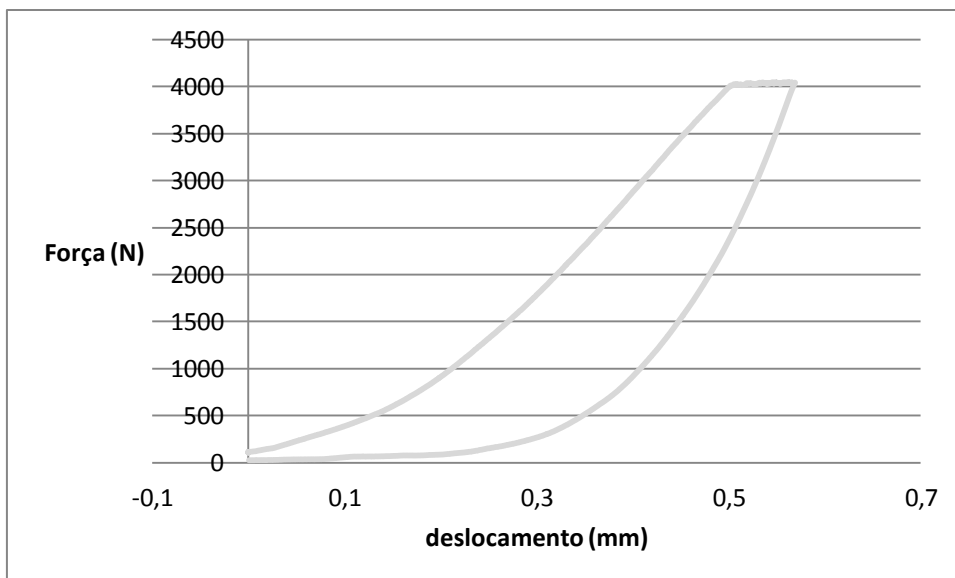


Figura 3.12– Ensaio de duas metades sobrepostas à compressão uniaxial

3.4. Preparação e desenvolvimento do ensaio de compressão uniaxial

As superfícies de ambas as extremidades de todas as amostras foram serradas de modo a se obter a sua regularização. Isto foi feito para minimizar ao máximo possíveis irregularidades e deste modo diminuir o atrito entre a superfície das amostras e a prensa, bem como para obter duas superfícies o mais paralelas possíveis.

Este requisito também é essencial de modo a sobrepor perfeitamente os pares ensaiados das amostras da camada de desgaste. Todas as amostras tiveram a sua altura e o seu diâmetro cuidadosamente medidos.



Figura 3.13—Comparação entre as superfícies de suas amostras, uma não serrada (esquerda) e uma serrada (direita)

Foram tomadas medidas para evitar a mobilização de atrito entre a superfície das amostras comprimidas e as bases da prensa de compressão, que decorre da fricção gerada no contacto entre prensa e amostra. O fator atrito não deve ser desprezado pois pode levar a leituras de carga superiores ao que está aplicado nas amostras na realidade, surgindo daqui o perigo de estimativa errada do valor de resistência do material.

Outra consequência do atrito é o surgimento da forma em “barril” dos provetes, quando submetidos a carregamento. De modo a impedir esta ocorrência foi decidido proceder-se à colocação de sabão líquido tanto nas duas faces das amostras como nas superfícies dos blocos da prensa. Segundo Dunhill (2002), que comparou os efeitos de vários materiais lubrificantes em procedimentos experimentais semelhantes, o sabão líquido é o que atua melhor na redução da fricção – fornecendo resultados de força registada 25% inferiores aos obtidos com as superfícies de contacto secas.

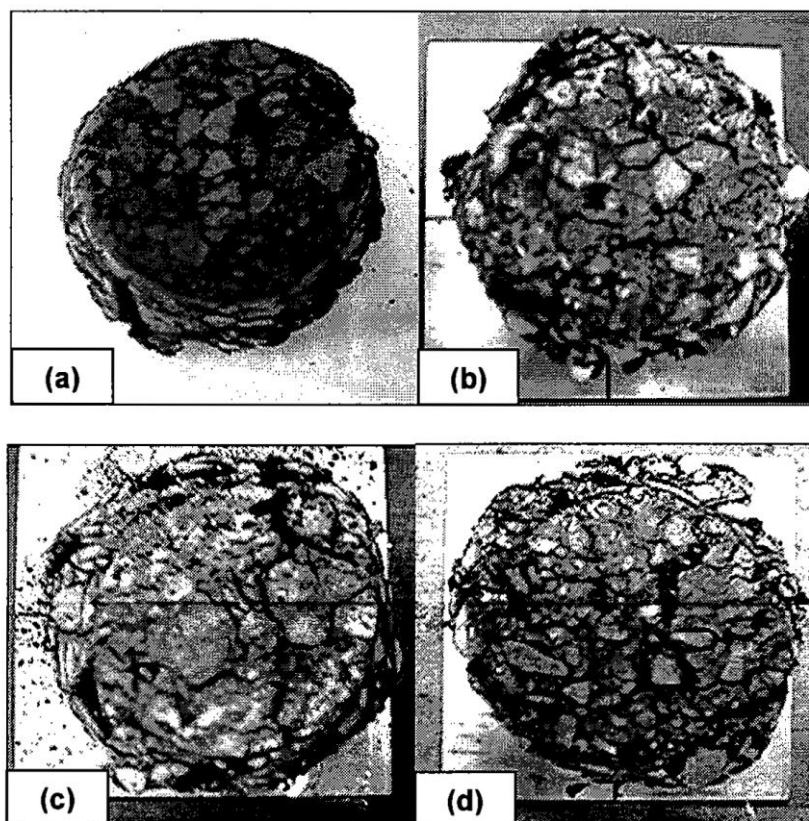


Figura 3.14– Comparação de quatro amostras ensaiadas à compressão uniaxial, sendo que na amostra (a) não houve aplicação de sistema de redução de fricção. Neste caso é visível a forma em “barril” do provete em comparação com os outros (Dunhill, 2002)

Antes de serem ensaiadas, é necessário assegurar que cada amostra se encontra à temperatura determinada para o ensaio. Deste modo cada amostra foi colocada na câmara climática onde foi submetida à devida temperatura por um período não inferior a 3 horas.

Assegurou-se igualmente que cada amostra não ficasse neste ambiente por mais de 6 horas, de modo a eliminar o risco de alteração das propriedades do betume devido a temperatura elevada. Os ensaios foram realizados com a câmara climática encerrada de forma a não se processarem alterações da temperatura das amostras.

Incluído no processo de acondicionamento das amostras está a aplicação de uma força de pré-carga antes de se dar início aos ensaios. Esta pré-carga destina-se a assegurar que a prensa está completamente encostada à amostra, eliminando possíveis variações nos resultados iniciais registados decorrentes do esmagamento de partículas soltas à superfície das amostras ou da própria fase de adaptação ou encosto da prensa à amostra.

De modo a não danificar de alguma maneira a amostra foi aplicada uma pré-carga de 0,5 kN, que corresponde a um valor residual quando comparado com o valor total de resistência das misturas betuminosas.

4. Ensaio Cíclico

4.1. Amostras Ensaadas

Para os ensaios de carregamento cíclico recorreu-se a amostras de macadame betuminoso em camada de ligação do tipo AC 20 bin 35/50 (MB). No Quadro 4.1 podem-se ver as características das amostras ensaiadas e a sua proveniência.

Quadro 4.1– Composição das misturas betuminosas ensaiadas ciclicamente

Misturas Betuminosas Ensaio In Situ								
Determinação da Baridade dos Carotes / EN 12697-6-29-8-36								
Ref. Externa	Espessura (mm)	Porosidade (%)	GC BMT (%)	GC BMB (%)	Lote/Intervenção	Pk	Faixa	Dist. Eixo (m)
65	86	3,4	96,6	100,8	10 - Sertã/Oleiros	10+750	Esq.	2
152	90	3,7	96,3	100,3	10 - Sertã/Oleiros	2+600	Esq.	2
162	90	5,2	94,8	99,2	10 - Sertã/Oleiros	9+100	Esq.	2,5

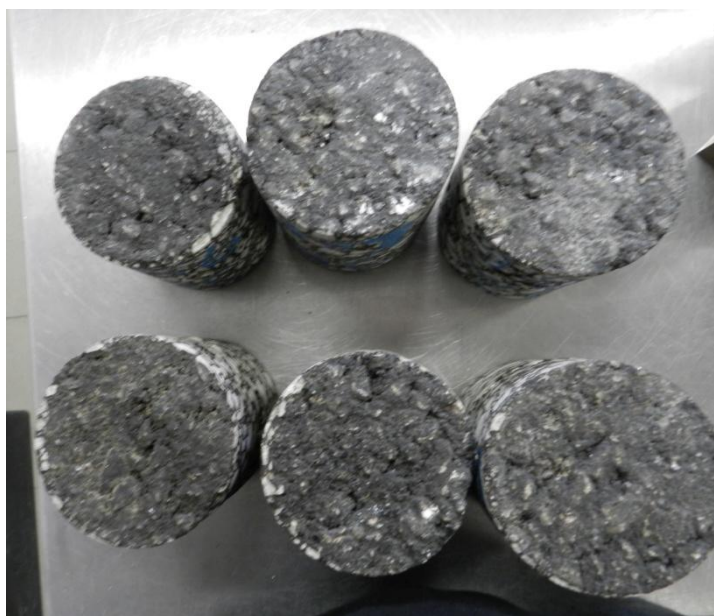


Figura 4.1– Carotes provenientes da camada de ligação AC 20 Bin 35/50 (MB) que forneceram as amostras para este estudo

4.2. Procedimento

Cada amostra foi submetida a três ciclos de carga descarga, a cinco velocidades diferentes, e três condições de temperatura diferente. Em cada ciclo as amostras foram carregadas até ao valor de 1500N, sendo posteriormente descarregadas até ao valor de 500 N. Este nível máximo de carregamento foi escolhido de modo a não se submeter a amostra a um valor excessivo de carga capaz de danificar ou alterar as suas características.

A necessidade de se colocar um nível mínimo na descarga de 500 N prende-se com condicionantes práticas de recolha de dados no equipamento ZWICK que apresenta problemas se a descarga atingir o zero. Por outro lado, pode-se considerar que um carregamento de 500 N é suficientemente pequeno para se obter uma gama de resultados satisfatória.

Os dados foram recolhidos no tramo descendente (descarga) do terceiro ciclo. Efetuou-se cada série a uma determinada frequência de carregamento, sendo que as velocidades seleccionadas para os ensaios tiveram os valores de 0,05 mm/seg, 0,1mm/seg, 0,3mm/seg, 0,5 mm/seg e 1 mm/seg. Embora esta gama de velocidades seja bastante baixa quando comparada com as velocidades de rolamento reais, optou-se por recorrer a estes valores pois quando se procede a ensaios no equipamento ZWICK a velocidades mais altas registam-se problemas derivados da inércia adquirida pela prensa, o que levou a dificuldades na execução destes ensaios para velocidades superiores a 1mm/seg.

Cada ensaio foi efetuado no interior da câmara climática a temperaturas controladas de 35°C, 50°C, e 65°C.

4.3. Resultados obtidos

Considerando, como usualmente se procede,, que as misturas betuminosas são isotrópicas, e que têm um comportamento elástico linear, o módulo de deformabilidade em conjunto com qualquer das outras constantes elásticas pode ser utilizado para definir o comportamento mecânico da mistura (Branco et al., 2008). É por este motivo importante que a recolha de dados sirva para efetuar este cálculo.

Após os ensaios são imediatamente recolhidos os valores de deformação das amostras, em relação à carga aplicada, e o tempo de ensaio. A partir destes dados base e a partir da conversão da carga em tensão foi obtido a valor do módulo de deformabilidade de cada provete. É a partir destes dados e da sua relação com o tempo ou frequência de ensaio que, recorrendo a um programa de tratamento de dados experimentais é possível realizar o ajuste de curvas e proceder à extração das constantes representativas de cada material. Isto é feito obtendo-se para cada caso uma relação polinomial na forma da expressão (4.1):

$$f(x) = ae^{bx} + ce^{dx} \quad (4.1)$$

sendo que a variável independente x e a função $f(x)$ representam respectivamente a variável tempo t e o módulo de deformabilidade dependente do tempo $E(t)$.

Portanto, o coeficiente a da equação à componente instantânea do módulo de elasticidade e o coeficiente b corresponde à componentes com atraso do módulo de elasticidade. Os coeficientes c e d avaliam a componente viscosa do material.

Sendo assim, a partir da expressão (4.1), obtemos a expressão (4.2):

$$E(t) = E_1 e^{(-E_1 t / \eta_1)} + E_2 e^{(-E_2 t / \eta_2)} \quad (4.2)$$

sendo que as constantes assumem o seguinte significado:

$$a = E_1, \quad (4.3)$$

$$b = E_2, \quad (4.4)$$

$$c = -E_1 / \eta_1, \quad (4.5)$$

$$d = E_2 / \eta_2 \quad (4.6)$$

A partir das relações entre estas constantes é possível saber como varia cada parâmetro em relação a diversas temperaturas e a diferentes tempos de ensaio (Barrão 2011).

No caso do presente trabalho, será usado o programa “LabFit Ajuste” para conhecer o valor dos parâmetros em estudo. Depois de se realizar a importação de dados para o programa este procede ao ajuste da curva com uma exponencial de quarto grau. Depois os dados resultantes da convergência, bem como a incerteza (desvio padrão) da operação ou curva de confiança são recolhidos.

No Anexo A apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios. Na Figura 4.2 a 4.4 podem ser comparados os resultados para uma das amostras para a mesma velocidade de ensaios e 3 diferentes temperaturas.

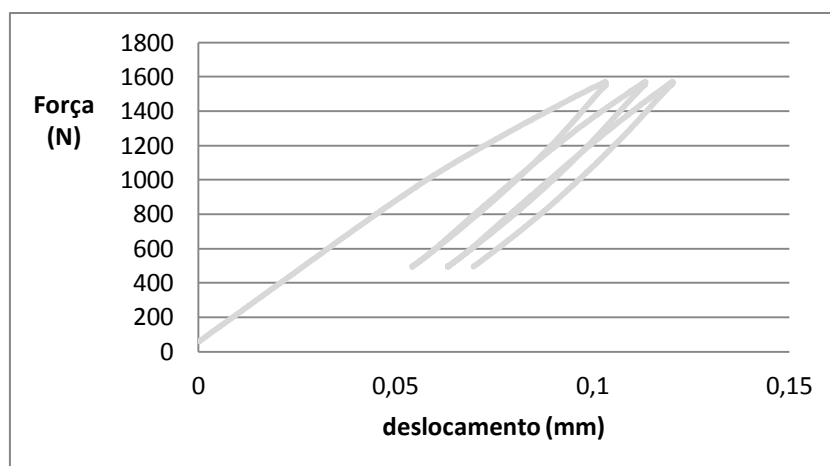


Figura 4.2– Comportamento da amostra nº65 a 35°C e 0,1mm/s

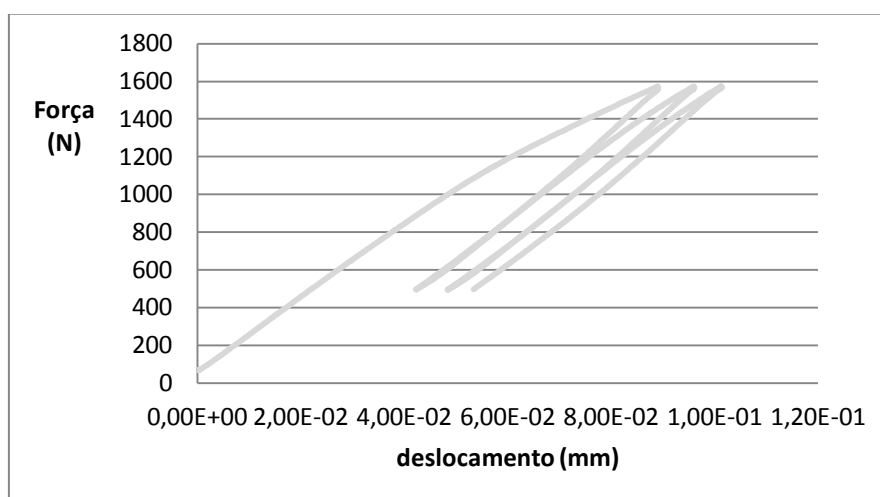


Figura 4.3– Comportamento da amostra nº65 a 50°C e 0,1mm/s

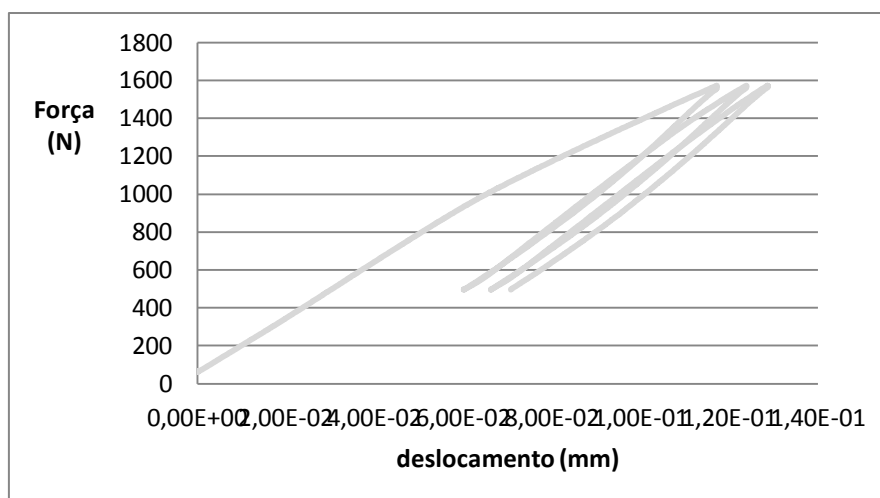


Figura 4.4– Comportamento da amostra nº65 a 65°C e 0,1mm/s

Nos Quadros 4.2, 4.3 e 4.4, bem como as Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 sintetizam os resultados em termos de módulo de deformabilidade em função do tempo e da frequência:

Quadro 4.2- Módulos de deformabilidade (kPa) obtidos para a mistura 65

Mistura	frequência (Hz)	tempo (sec)	35°C	50°C	65°C
65	0,006221008	160,75	239829,1	224390,6	163919,8
	0,01545197	64,72	253406,3	246833,1	203689,3
	0,045537341	21,96	269212,5	266890,7	231478,9
	0,073206442	13,66	296294,6	283707,9	257122,8
	0,098296199	10,17	315799,1	297783,9	284918,6

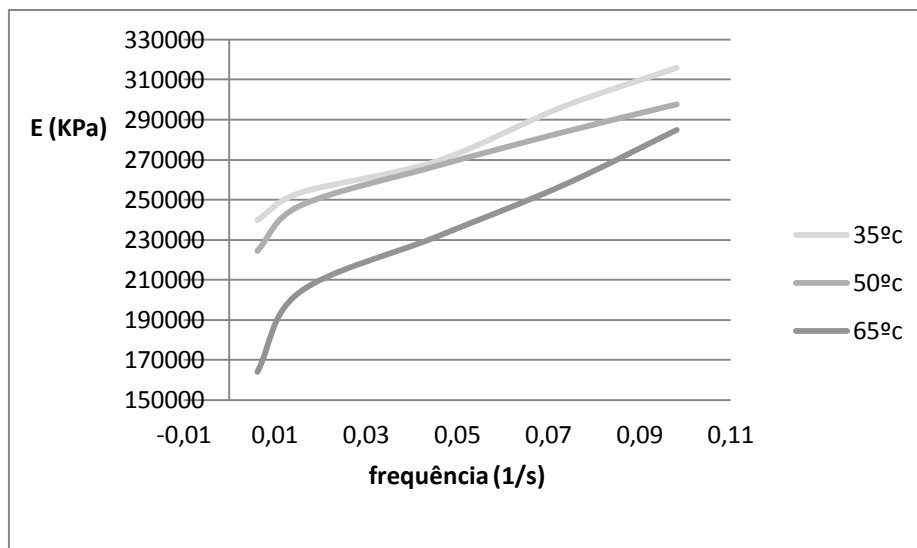


Figura 4.5– Evolução de módulo de deformabilidade E em termos de frequência para a mistura 65

Quadro 4.3- Módulos de deformabilidade (kPa) obtidos para a mistura 152

Mistura	frequencia (Hz)	tempo (sec)	35°C	50°C	65°C
152	0,005901759	169,44	212872,9	192291,7	174852,5
	0,014157622	70,63	236735,8	222676,6	208153
	0,045969966	21,75	277094,9	252168,3	237912,1
	0,078657577	12,71	307056,9	273989,5	261635,6
	0,112602046	8,88	335311,5	291328,7	282137,4

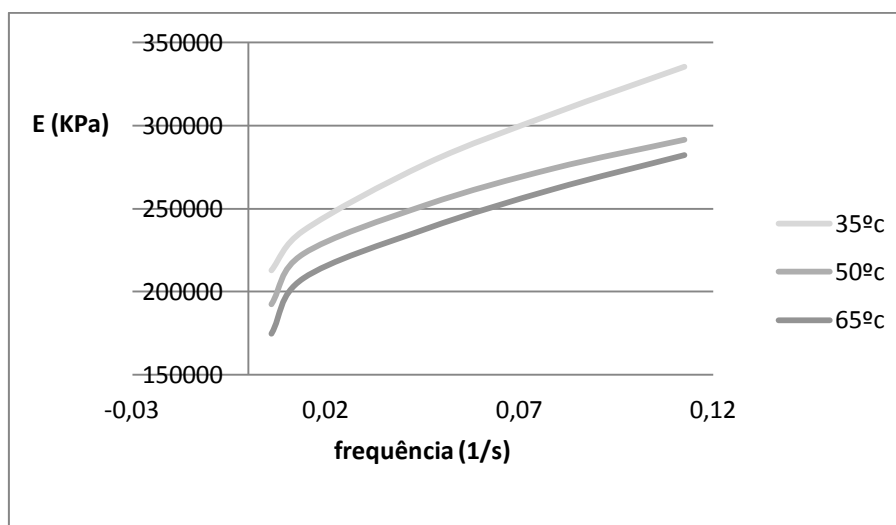
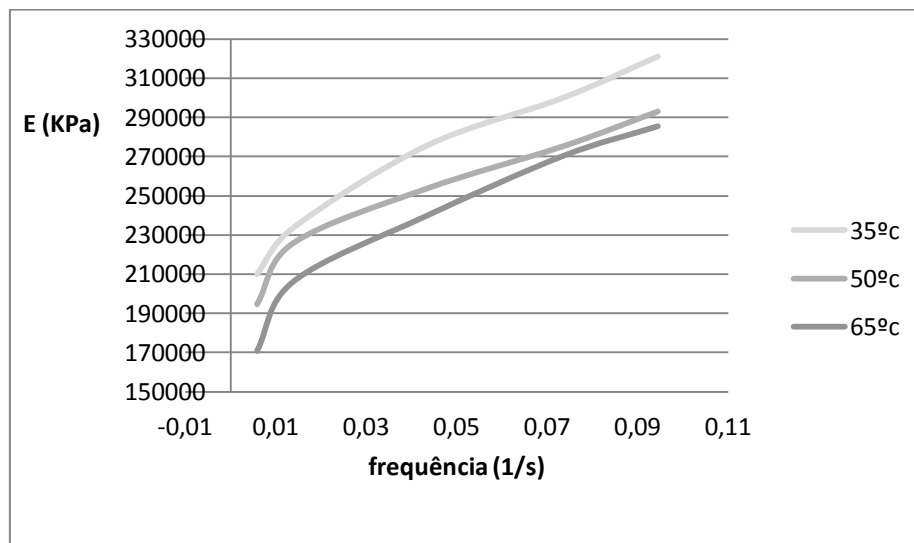


Figura 4.6– Evolução de módulo de deformabilidade E em termos de frequência para a mistura 152

Quadro 4.4- Módulos de deformabilidade (kPa) obtidos para a mistura 162

Mistura	frequência (Hz)	tempo (sec)	35°C	50°C	65°C
162	0,00583476	171,39	210034,1	194694,6	170644,2
	0,013936635	71,75	233844,2	225995,1	206226,2
	0,043190325	23,15	275428,9	253518,9	239567,8
	0,073529412	13,60	300026	275227,8	270336
	0,094488189	10,58	321130,9	292950,9	285507,7

Figura 4.7– Evolução de módulo de deformabilidade E em termos de frequência para a mistura 162

4.4. Parâmetros do modelo de Burgers

Nas figuras 4.8 a 4.16 podem-se ver os resultados do ajuste da função tal como são fornecidos pelo programa LabFit., indicando-se os valores dos parâmetros a , b , c e d da expressão 4.2. De uma forma geral obteve-se um bom ajustamento na obtenção dos valores destes parâmetros.

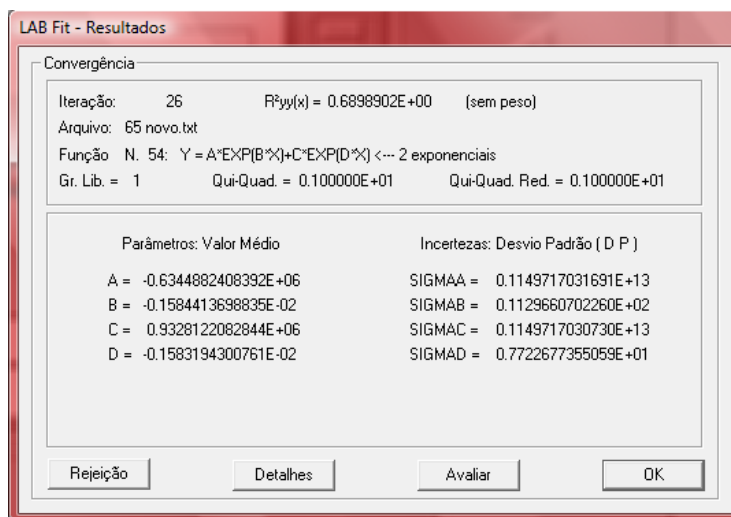


Figura 4.8– Resultados LabFit para a mistura n°65 a 35°C

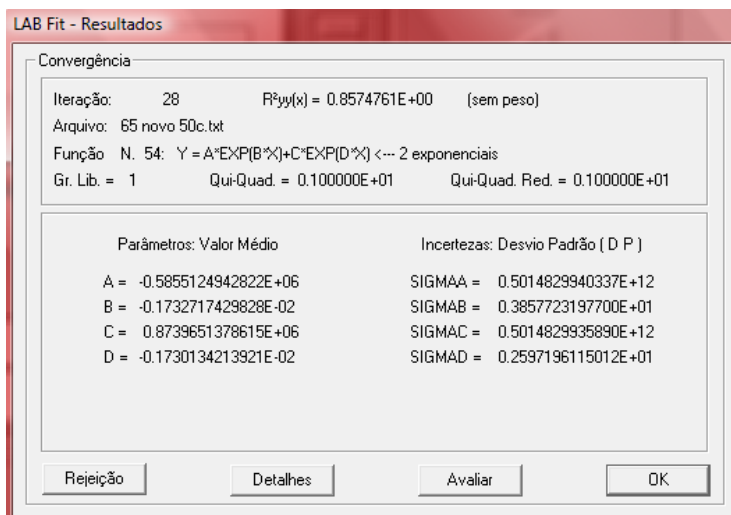


Figura 4.9– Resultados LabFit para a mistura n°65 a 50°C

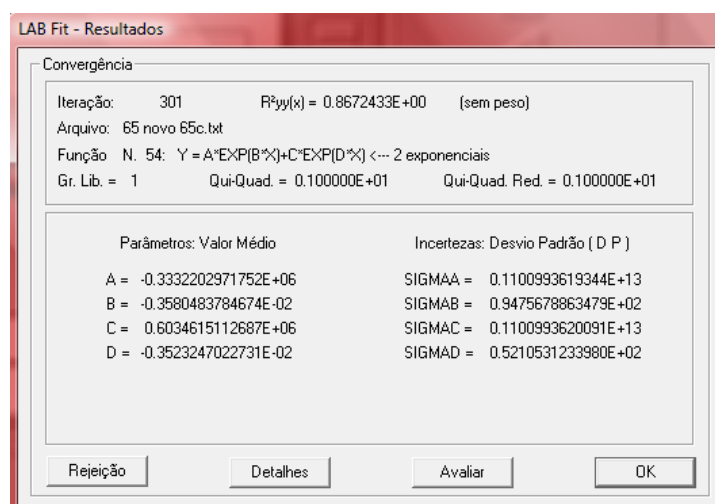


Figura 4.10– Resultados LabFit para a mistura n°65 a 65°C

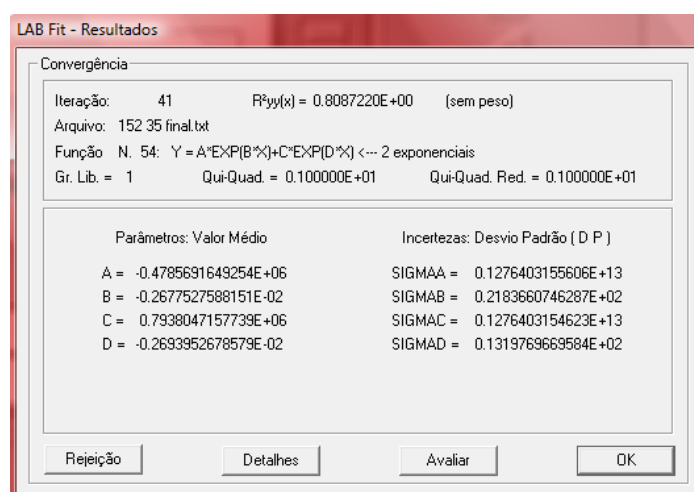


Figura 4.11– Resultados LabFit para a mistura n°152 a 35°C

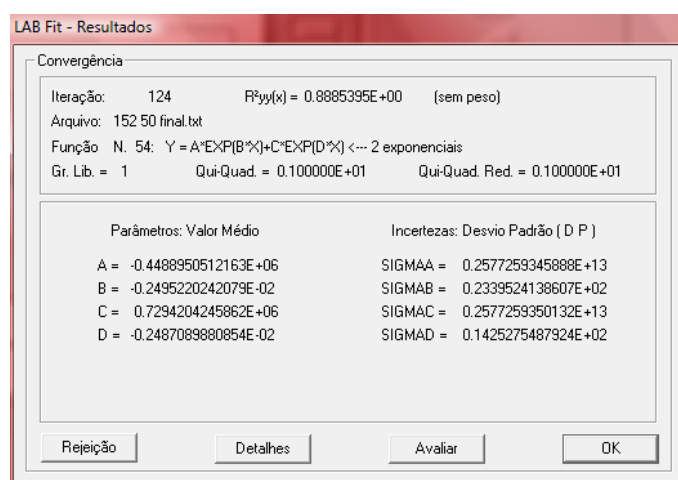


Figura 4.12– Resultados LabFit para a mistura n°152 a 50°C

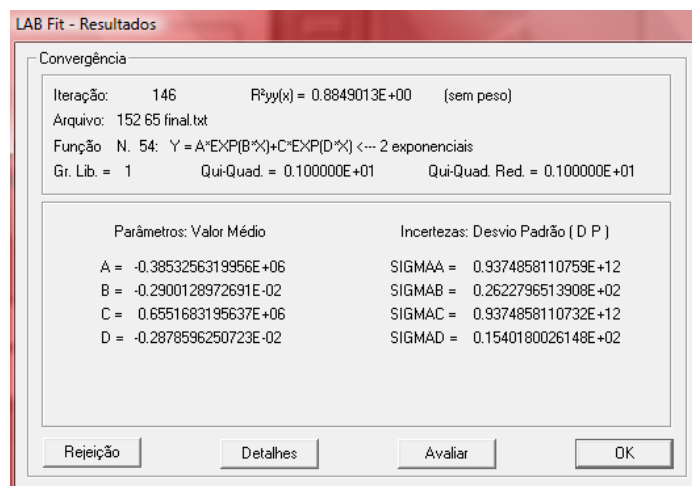


Figura 4.13– Resultados LabFit para a mistura n°152 a 65°C

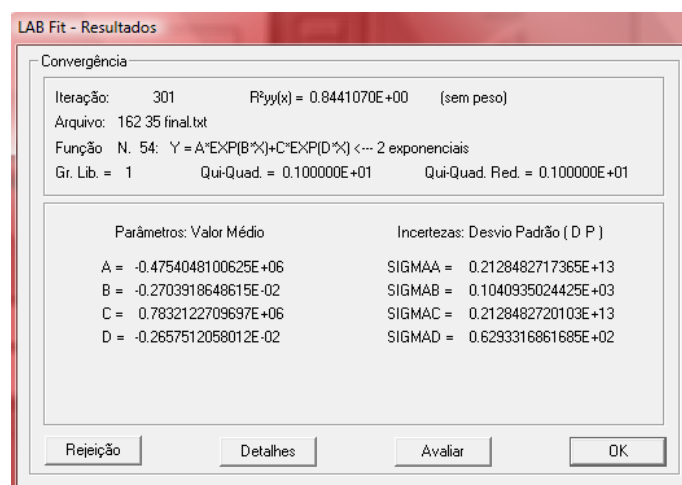


Figura 4.14– Resultados LabFit para a mistura n°162 a 35°C

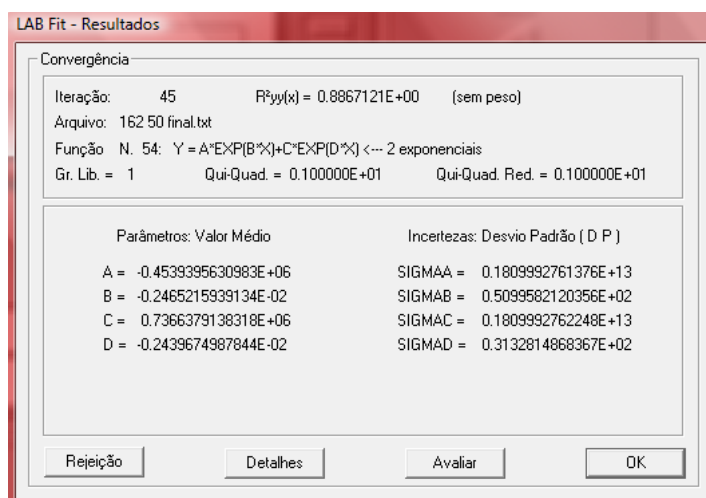


Figura 4.15– Resultados LabFit para a mistura n°162 a 50°C

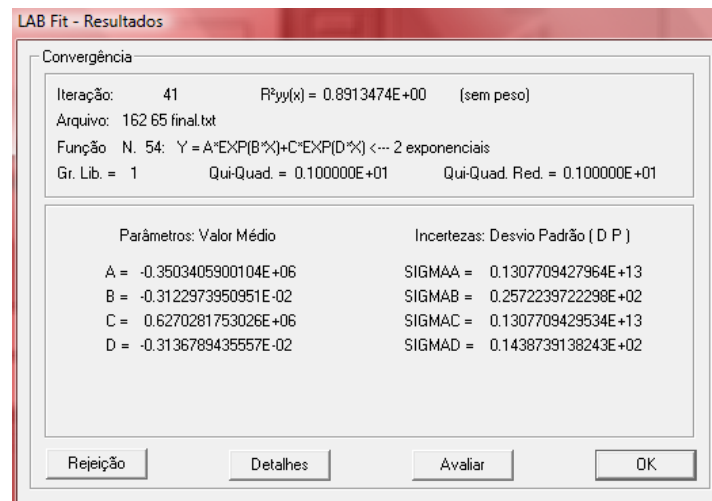


Figura 4.16– Resultados LabFit para a mistura n°162 a 65°C

Com base nos resultados obtidos para os parâmetros a, b, c e d da expressão 4.2 deduziram-se os valores dos parâmetros E_1 , E_2 , η_1 e η_2 do modelo de Burgers através das expressões 4.3 a 4.6. Nas Figuras 4.17 a 4.28 apresenta-se a variação com a temperatura dos valores obtidos para os parâmetros E_1 , E_2 , η_1 e η_2 do modelo de Burgers

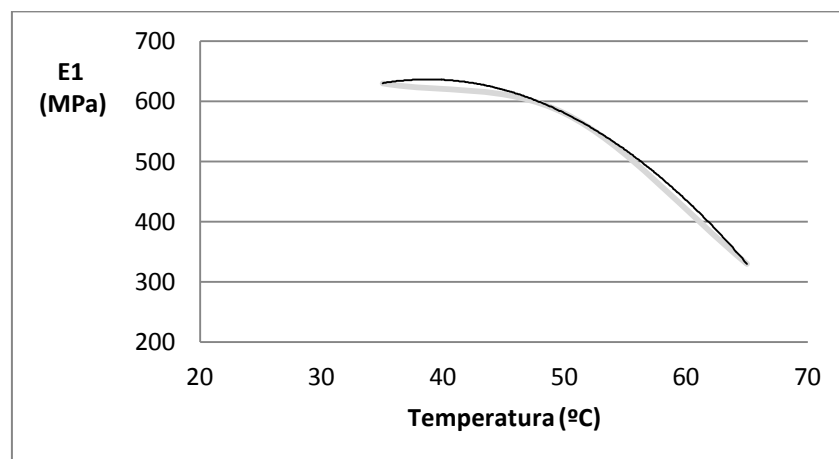


Figura 4.17– Evolução do parâmetro E1 da mistura n°65 com a temperatura

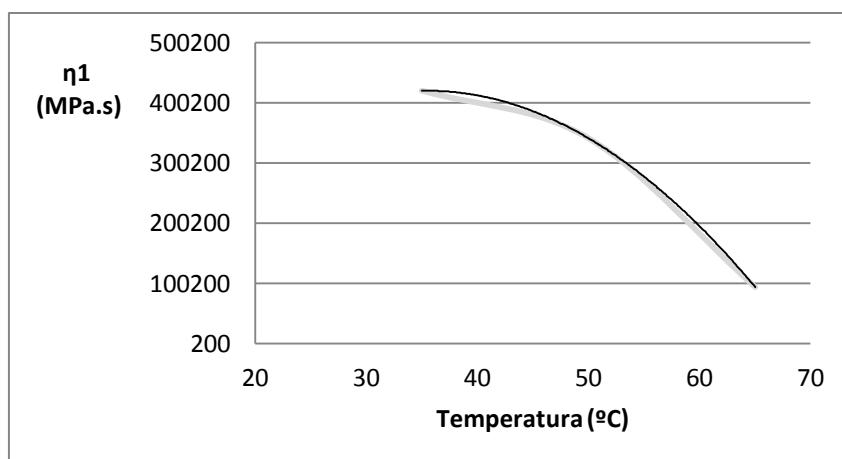


Figura 4.18– Evolução do parâmetro η_1 da mistura nº65 com a temperatura

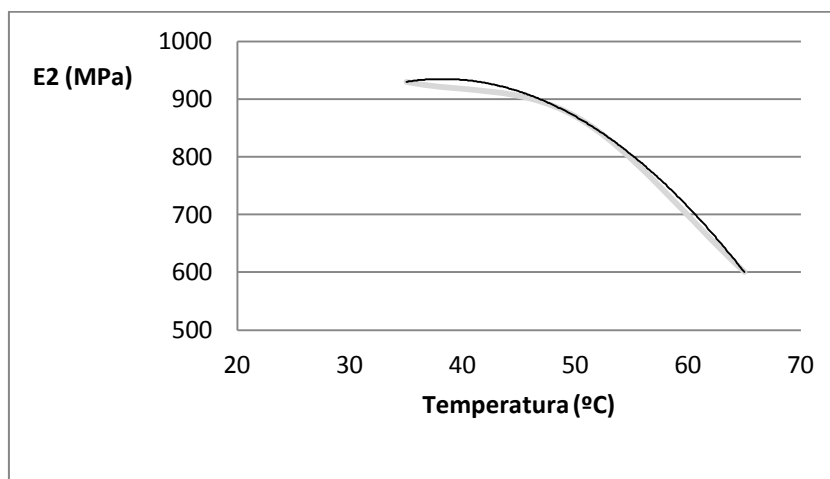


Figura 4.19– Evolução do parâmetro E_2 da mistura nº65 com a temperatura

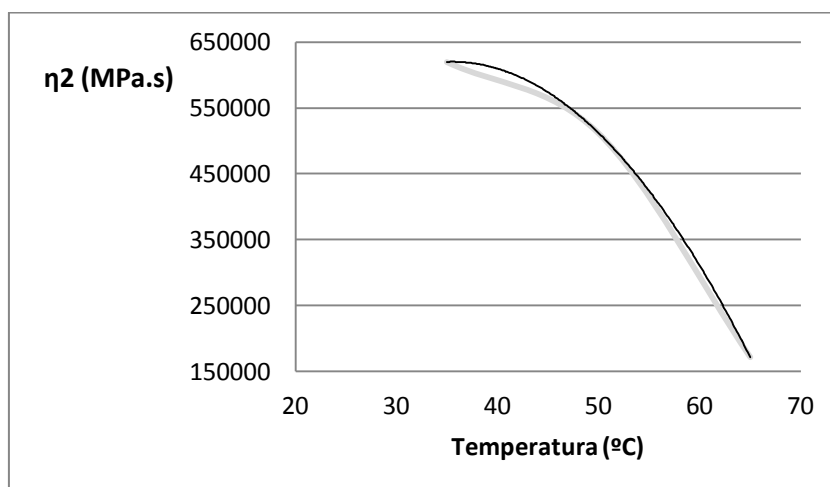


Figura 4.20– Evolução do parâmetro η_2 da mistura nº65 com a temperatura

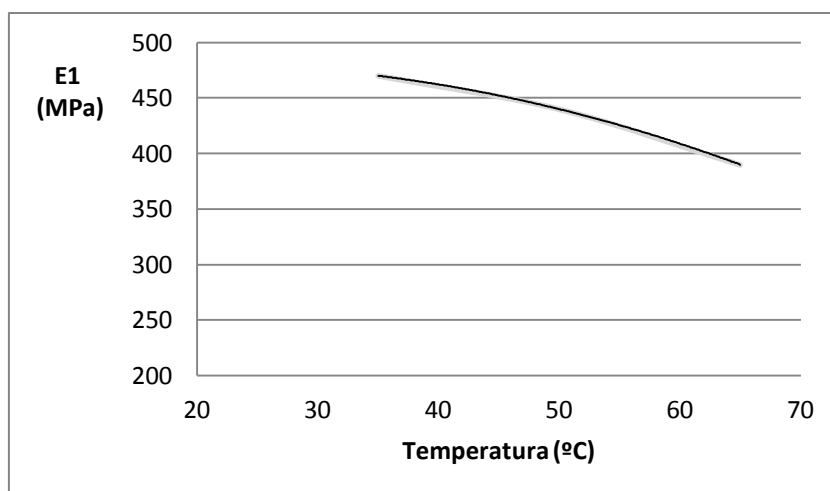


Figura 4.21– Evolução do parâmetro E1 da mistura nº152 com a temperatura

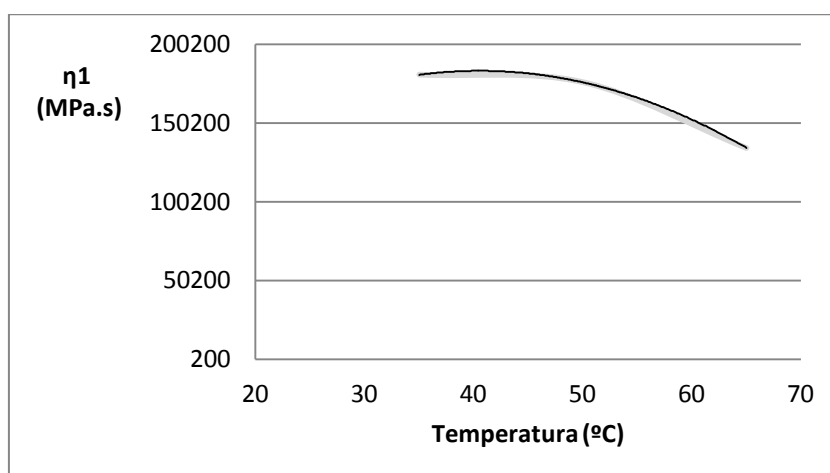


Figura 4.22– Evolução do parâmetro η1 da mistura nº152 com a temperatura

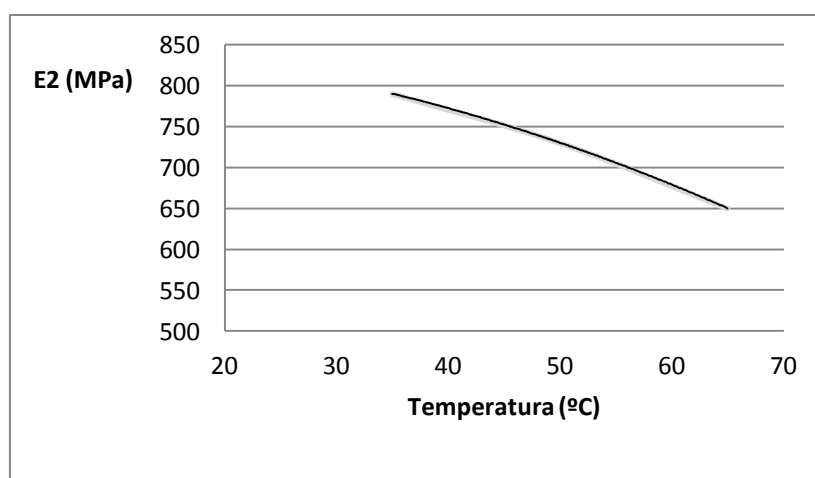


Figura 4.23– Evolução do parâmetro E2 da mistura nº152 com a temperatura

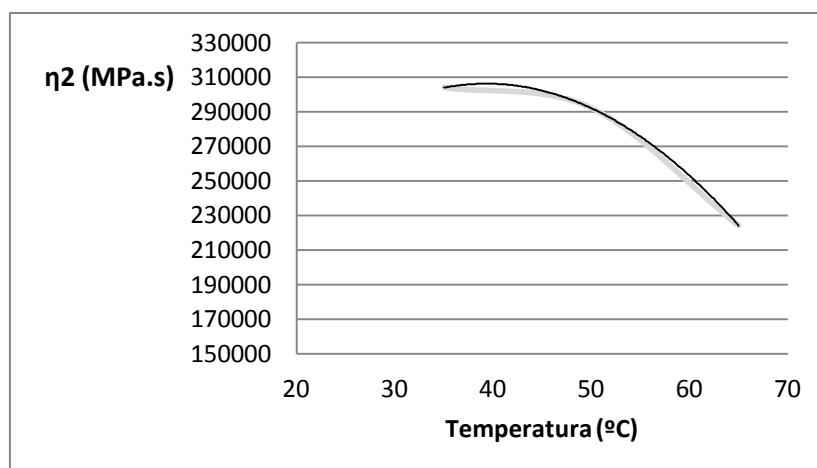


Figura 4.24– Evolução do parâmetro η_2 da mistura nº152 com a temperatura

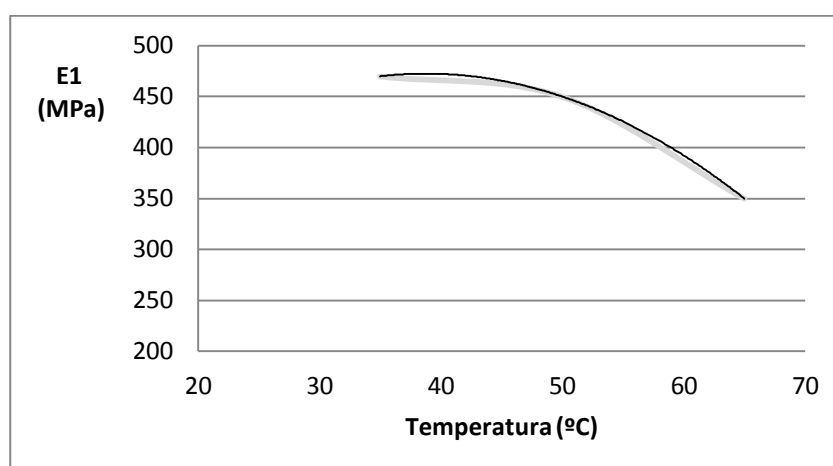


Figura 4.25– Evolução do parâmetro E_1 da mistura nº162 com a temperatura

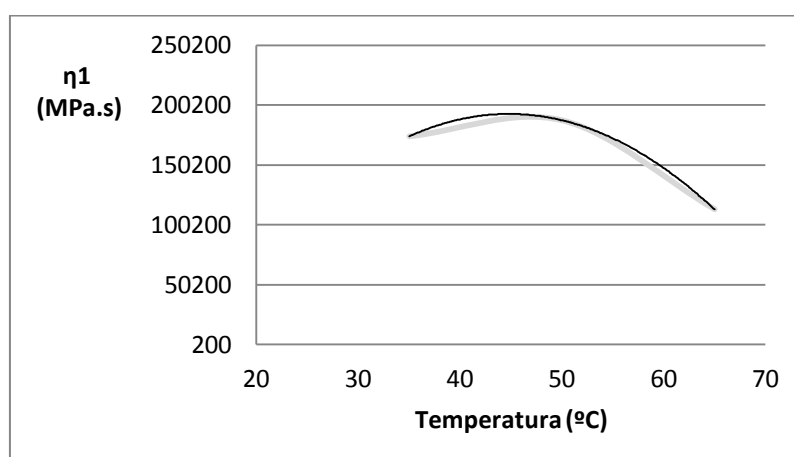


Figura 4.26– Evolução do parâmetro η_1 da mistura nº162 com a temperatura

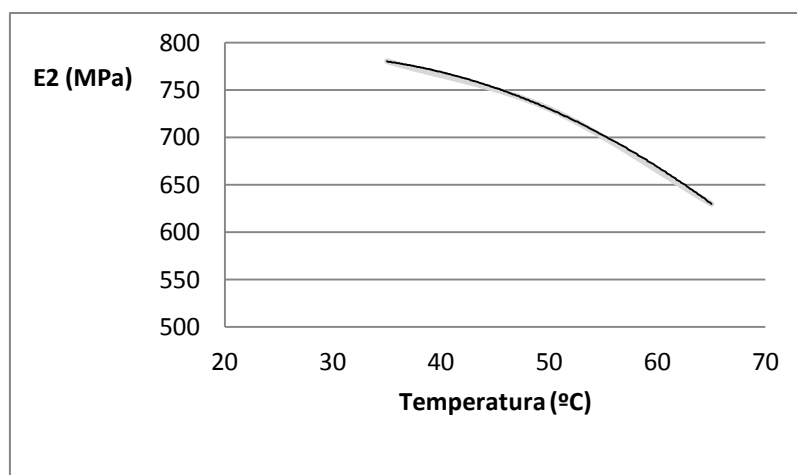


Figura 4.27– Evolução do parâmetro $E2$ da mistura nº162 com a temperatura

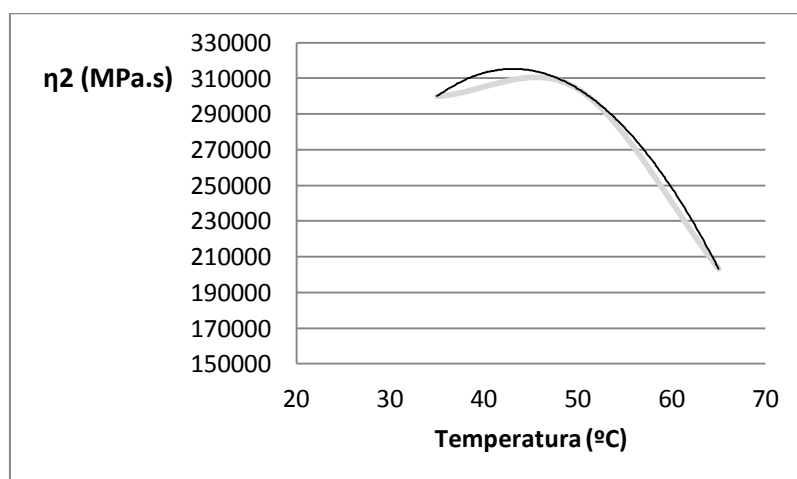


Figura 4.28– Evolução do parâmetro $\eta2$ da mistura nº162 com a temperatura

4.5. Comparação do módulo de deformabilidade obtido com métodos analíticos

Após a dedução dos valores de módulo de deformabilidade provenientes dos ensaios cíclicos, e devido à falta de dados de trabalhos semelhantes, foi decidido comparar os valores obtidos com os resultantes das metodologias desenvolvidas pela Shell e pela Universidade de Nottingham.

Os métodos de estimativa de módulo de deformabilidade desenvolvidos pela Shell, por Van der Poel (1954), permitiram desenvolver um ábaco para estimativa da rigidez do betume. O método desenvolvido pela Universidade de Nottingham (Brown e Brunton, 1990) visa a obtenção do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas através de fórmulas..

A metodologia de Nottingham foi concebida por regressão dos resultados de inúmeros ensaios de modo a permitirem um cálculo simplificado do módulo de deformabilidade. Nesta metodologia considera-se que as características do agregado, como o seu tipo e a sua granulometria, não influenciam diretamente o valor do módulo de deformabilidade da mistura, tal como é indicado na Figura 4.29 (Lopes, 2008). O cálculo do módulo de deformabilidade de acordo com este método é baseado nas expressões (Brown e Brunton, 1990):

$$E_m = Sb \times \left[1 + \frac{257,5 - 2,5 \times VMA}{N \times (VMA - 3)} \right]^N \quad (4.3)$$

$$N = 0,83 \times \log \frac{4 \times 10^4}{Sb} \quad (4.4)$$

Onde,

E_m - módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (MPa)

Sb – rigidez do betume (MPa)

VMA - volume de vazios no esqueleto do agregado da mistura em percentagem, cujo valor se encontrar entre os limites mínimo e máximo de 12% e 30%.

Em alternativa ao uso desta expressão, é possível recorrer a nomogramas desenvolvidos pelos seus autores para estimar o módulo de deformabilidade duma mistura betuminosa:

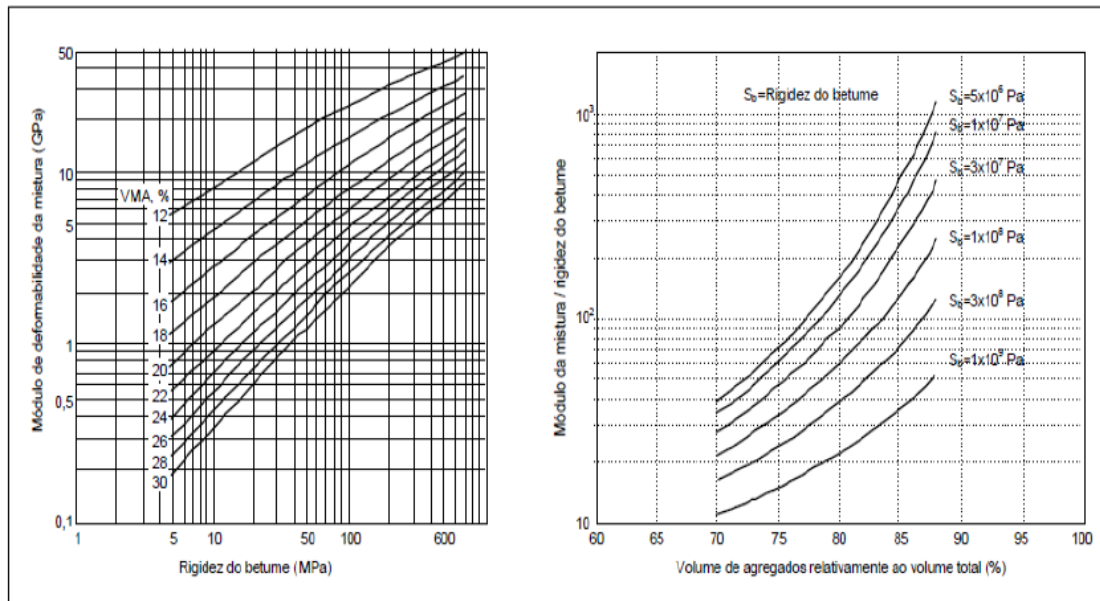


Figura 4.29- Relação entre o módulo de deformabilidade da mistura e a rigidez do betume (Lopes 2008)

Fica imediatamente claro a partir da análise destas equações e gráficos que, para os valores de módulo de deformabilidade encontrados a partir das misturas ensaiadas no presente trabalho, que se encontram compreendidos entre os 0,17 e os 0,31 GPa, possuindo estas misturas de agregados um volume de vazios de 16%, que o valor dos módulos de rigidez do betume correspondente terá de ser bastante baixo, inferior a 5MPa, o que pode indiciar um comportamento não linear por parte das misturas, não sendo portanto recomendável recorrer a estas expressões para obter valores de módulo de deformabilidade das misturas. (Murtinheira 2011).

No entanto, e dada a coerência de resultados obtidos experimentalmente, decidiu-se prosseguir com este método de validação de dados, tendo por objetivo a obtenção de valores teóricos de ordem de grandeza semelhante aos encontrados, tendo sempre em conta o grau de erro potencial que decorre de estar-se a trabalhar com betumes com módulos de rigidez bastante baixos.

O ábaco de Van der Poel fornece valores do módulo de rigidez do betume para qualquer temperatura e frequência de aplicação das cargas, sendo necessário possuir conhecimento prévio do ponto de amolecimento pelo método anel e bola, bem como dos valores de índice de penetração PI.

O comportamento do betume a altas temperaturas é classificado a partir da determinação do ponto de amolecimento do betume, uma vez que estes não possuem uma temperatura bem definida de transição entre o estado sólido e líquido, pelo método de anel e bola. Este valor representa a temperatura necessária para que um provete de betume submetido a um aquecimento progressivo e ao peso de uma esfera de aço atinja uma consistência que leve ao seu escoamento através do anel metálico, até uma deformação especificada por uma placa de referência situada 25mm abaixo da posição inicial do fundo da amostra.

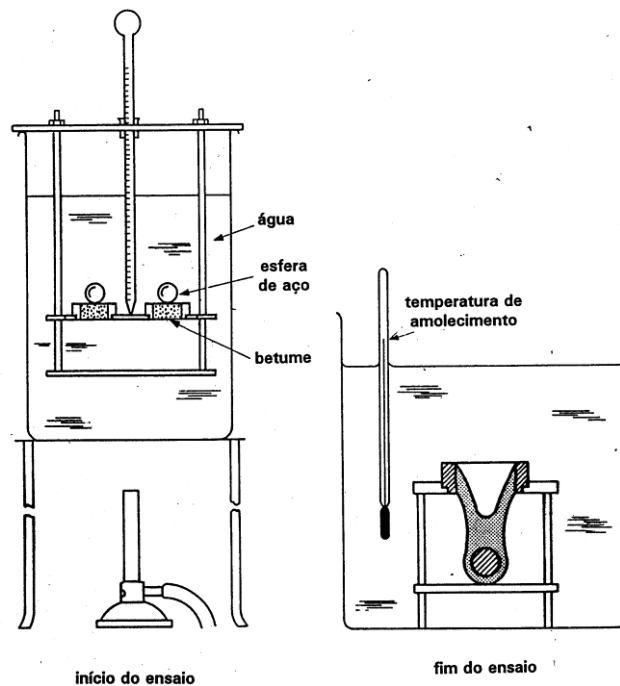


Figura 4.30- Ensaio de anel e bola (Quaresma 2010)

Tendo em conta o envelhecimento a curto prazo resultante do fabrico e colocação em obra das misturas, os valores da penetração e temperatura anel e bola devem ser corrigidos segundo as expressões (4.5) e (4.6) (os valores corrigidos assinalam-se com o índice r) :

$$(pen_{25})_r = 0,65 (pen_{25})_i \quad (4.5)$$

$$(T_{ab})_r = 98,4 - 26,4 \log (pen_{25})_r \quad (4.6)$$

em que:

(pen_{25}) - valor de penetração do betume a uma temperatura de 25 °C em 10^{-1} mm;

(T_{ab}) – temperatura anel e bola em °C

O Índice de Penetração (*IPen*) permite caracterizar a sensibilidade dos betumes à temperatura, sendo que o betume é menos sensível à temperatura quanto mais elevado for o seu valor de IP. Possuindo o valor de penetração corrigido e a temperatura de amolecimento anel e bola é possível obter o *IPen* a partir da expressão de Pfeiffer e Van Dormal (4.7):

$$IP_{en} = \frac{20 \times Tab + 500 \times \log(pen25) - 1955,55}{Tab - 50 \times \log(pen25) + 120,15} \quad (4.7)$$

Para as amostras que compõem o presente estudo obteve-se um valor de IP geral de -0,26 (betume 35/50).

Possuindo o valor do índice de penetração, é finalmente possível recorrer ao ábaco de van der Poel para obter uma estimativa do módulo de rigidez de volume.

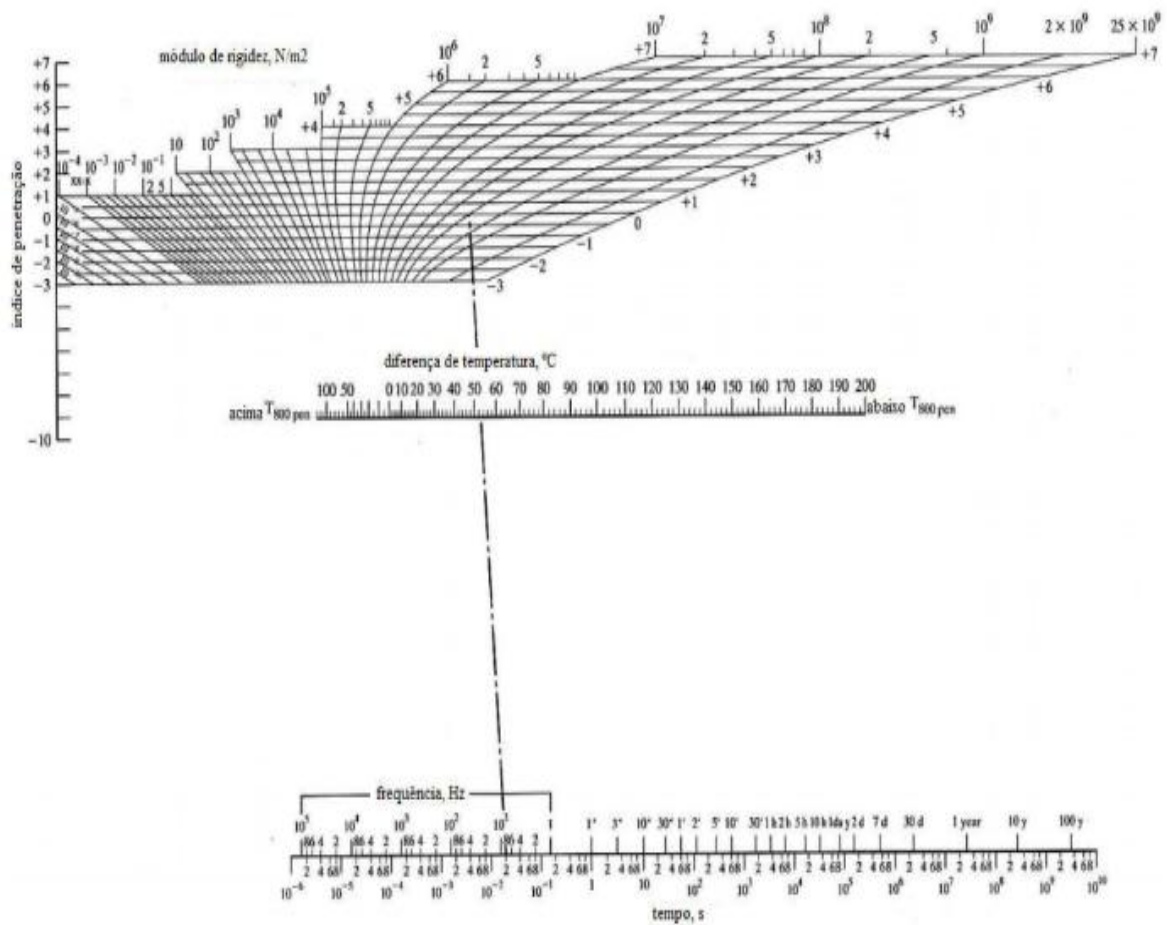


Figura 4.31- Ábaco de Van der Poel (Lopes 2008)

É possível retirar os valores pretendidos por observação direta do ábaco, no entanto este processo torna difícil a obtenção de valores precisos, pelo que é conveniente recorrer a expressões baseadas nele. O uso destas tem a vantagem adicional de permitir a programação do cálculo, tornando-o mais fácil e rápido.

Recorreu-se deste modo à equação (4.8) fornecida por Ullidtz e Peattie:

$$Sb = 1,157 \times 10^{-7} \times tc^{-0,368} \times 2,718^{-IP_{enr}} \times (Tab_r - T)^5 \quad (4.8)$$

Em que Sb é a rigidez do betume em MPa e tc é o tempo de carregamento em segundos. De notar que este valor refere-se ao tempo em que um carregamento constante está aplicado, tal como se representa na figura 4.32, e que no presente trabalho os carregamentos foram aplicados de forma crescente, seguidos de descarga também contínua. Deste modo, este facto poderá causar alguns problemas na obtenção de valores teóricos de rigidez de betume apropriados, no entanto, considera-se que para valores de tempo de carregamento mais baixos o erro decorrente deste fator será minimizado.

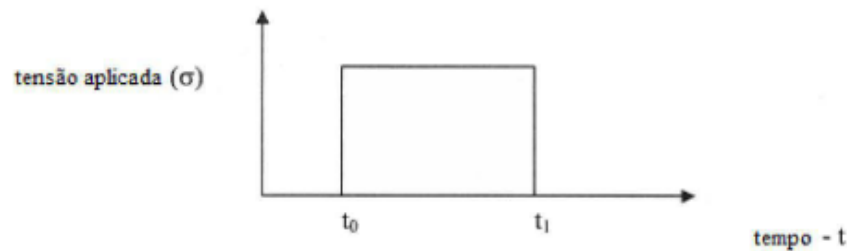


Figura 4.32- Aplicação de Tensão Constante

Tomando em conta todas estas considerações e recorrendo à expressão acima, efetuou-se a simulação do cálculo da rigidez do betume para um tempo de carregamento de 20 segundos a uma temperatura de 35°C, no que resultou um valor de rigidez de betume de 0,5MPa e um módulo de deformabilidade da mistura teórico, após a utilização das expressões do método da Universidade de Nottingham, de 393MPa.

Dado que os valores de módulo recolhidos a partir dos ensaios efetuados para condições semelhantes são da ordem dos 320MPa, e que considerando que os resultados dos módulos de deformabilidade calculados pelo método de Nottingham são em geral superiores aos obtidos por outros métodos, sendo portanto de esperar um valor teórico superior ao adquirido na prática (Murtinheira 2011), considera-se que o valor obtido desta maneira encontra-se na mesma ordem de valores do que foi obtido na prática e que assim o procedimento e os resultados encontram-se validados.

5. Ensaaios à Rotura

5.1. Amostras Ensaaiadas

Para os ensaios de carregamento até à rotura recorreu-se tanto a amostras da camada de ligação AC 20 bin 35/50 (MB), como a amostras da camada de desgaste AC 14 surf 35/50 (BB), sendo ensaiadas no total 14 amostras de cada camada. Nos Quadros 5.1, 5.2 e 5.3 podem-se ver as características das amostras ensaiadas e a sua proveniência:

Quadro 5.1 - Composição das misturas betuminosas ensaiadas à rotura – camada de ligação

Misturas Betuminosas Ensaaios in Situ								
Determinação da Baridade dos Carotes /EN 12697-6-29-8-36								
Ref. Externa	Espessura (mm)	Porosidade (%)	GC BMT (%)	GC BMB (%)	Lote/Intervenção	Pk	Faixa	Dist. Eixo (m)
54	84	6,1	93,9	98,9	10 - Sertã/Oleiros	17+875	Esq.	5
59	85	3,7	96,3	100,7	10 - Sertã/Oleiros	17+375	Dir.	2
128	77	6,9	93,1	97,4	10 - Sertã/Oleiros	0+025	Esq.	1
131	77	4,3	95,7	99,7	10 - Sertã/Oleiros	0+500	Dir.	2
138	76	4,7	95,3	99,6	10 - Sertã/Oleiros	1+200	Esq.	2
141	80	4,7	95,3	100	10 - Sertã/Oleiros	1+500	Dir.	2
159	79	7,3	92,7	97,5	10 - Sertã/Oleiros	3+300	Dir.	4
243	97	4,9	95,1	99,4	10 - Sertã/Oleiros	5+600	Dir.	3,5
247	91	4,5	95,5	100,6	10 - Sertã/Oleiros	5+200	Dir.	2
249	87	4	96	101,1	10 - Sertã/Oleiros	5+000	Dir.	2
250	101	5,5	94,5	99,5	10 - Sertã/Oleiros	4+900	Esq.	2
251	105	3,3	96,7	101,8	10 - Sertã/Oleiros	4+800	Dir.	3
253	95	6,4	93,6	98,1	10 - Sertã/Oleiros	12+150	Dir.	2
254	96	4,9	95,1	99,7	10 - Sertã/Oleiros	12+050	Esq.	3

GC – grau De compactação

BMT –baridade máxima teórica

Pk –posto quilométrico

Quadro 5.2– Composição das misturas betuminosas ensaiadas à rotura – camada de desgaste

Misturas Betuminosas Ensaio in Situ								
Determinação da Baridade dos Carotes /EN 12697-6-29-8-36								
Ref. Externa	Espessura (mm)	Porosidade (%)	GC BMT (%)	GC BMB (%)	Lote/Intervenção	Pk	Faixa	Dist. Eixo (m)
267	49	5,5	94,5	97,7	10 - Sertã/Oleiros	11+200	Dir.	5
279	54	5,9	94,1	98	10 - Sertã/Oleiros	10+100	Esq.	2
290	56	6,6	93,4	97,3	10 - Sertã/Oleiros	9+300	Esq.	2
299	62	4	96	99,4	10 - Sertã/Oleiros	16+500	Dir.	3
301	57	6,2	93,8	97,1	10 - Sertã/Oleiros	16+300	Dir.	2
302	54	6,9	93,1	96,4	10 - Sertã/Oleiros	16+300	Esq.	2
309	52	7,8	92,2	95,3	10 - Sertã/Oleiros	12+400	Dir.	2
311	54	5,6	94,4	98,3	10 - Sertã/Oleiros	12+200	Dir.	2
314	58	5,5	94,5	98,4	10 - Sertã/Oleiros	11+900	Esq.	2
316	57	5,3	94,7	98,3	10 - Sertã/Oleiros	0+075	Esq.	2
318	51	4,5	95,5	99,5	10 - Sertã/Oleiros	0+700	Dir.	2
320	46	6,5	93,5	97,4	10 - Sertã/Oleiros	0+800	Esq.	2
322	50	5,6	94,4	98,4	10 - Sertã/Oleiros	0+900	Dir.	4
324	45	6,1	93,9	97	10 - Sertã/Oleiros	1+100	Dir.	2
326	50	5,9	94,1	97,3	10 - Sertã/Oleiros	1+200	Esq.	2
332	48	6,1	93,9	97,8	10 - Sertã/Oleiros	1+700	Dir.	2
337	56	5,2	94,8	98,2	10 - Sertã/Oleiros	2+100	Dir.	2
339	50	6,5	93,5	96,9	10 - Sertã/Oleiros	2+300	Dir.	2
342	54	6,4	93,6	97,2	10 - Sertã/Oleiros	2+600	Esq.	2
344	53	6,6	93,4	96,9	10 - Sertã/Oleiros	2+800	Esq.	2
346	50	6,2	93,8	97,2	10 - Sertã/Oleiros	3+000	Esq.	2
348	45	5,9	94,1	97,5	10 - Sertã/Oleiros	3+200	Esq.	2
351	45	6,7	93,3	96,5	10 - Sertã/Oleiros	0+050	Esq.	2
354	54	5,7	94,3	97,5	10 - Sertã/Oleiros	0+300	Dir.	2
356	42	4,3	95,7	99,6	10 - Sertã/Oleiros	11+600	Dir.	2
365	54	3,4	96,6	100	10 - Sertã/Oleiros	0+025	Esq.	2
370	47	6,1	93,9	97,6	10 - Sertã/Oleiros	0+200	Dir.	2
371	55	5,4	94,6	97,8	10 - Sertã/Oleiros	0+100	Dir.	2

GC – grau e compactação

BMT –baridade máxima teórica

Pk –posto quilométrico

Embora todas as amostras submetidas a ensaio possuam o mesmo valor de diâmetro (10cm), através dos dados fornecidos acima é visível uma diferença importante a nível da altura das amostras entre as provenientes da camada de ligação e as da camada de desgaste:

Efetivamente, enquanto que a espessura para a camada de ligação se situa entre 8,4 e 10,5 cm, o que corresponde a uma relação altura diâmetro de 0,84 a 1,05 sendo um rácio suficiente para evitar o “efeito de fronteira”, a altura das amostras provenientes da camada de desgaste é bastante inferior, situando-se para este caso entre 4,2 e 6,2 cm, o que iria suscitar problemas causados pelo referido efeito quando as amostras fossem submetidas à compressão uniaxial. Deste modo, optou-se por ensaiar as amostras provenientes desta camada aos pares sobrepostos, obtendo-se para cada par um volume quase homogéneo que atue como um único corpo.

Cada par foi escolhido de modo a que cada metade tivesse as características o mais semelhante possível à outra; para este efeito, a baridade (kg/m) foi o fator de semelhança escolhido para seleção e agrupamento dos espécimes.

Quadro 5.3– Seleção das amostras ensaiadas à rotura – pares da camada de desgaste

Ref.	massa (kg)	altura (cm)	kg/cm
342	0,93	5,4	0,172
320	0,8	4,6	0,174
356	0,8	4,2	0,19
365	1,03	5,4	0,191
346	0,9	5	0,18
314	1,05	5,8	0,181
348	0,79	4,5	0,176
351	0,79	4,5	0,176
326	0,94	5	0,188
318	0,96	5,1	0,188
344	0,96	5,3	0,181
332	0,87	4,8	0,181
339	0,88	5	0,176
324	0,8	4,5	0,178
370	0,87	4,7	0,185
316	1,07	5,7	0,188
290	1	5,6	0,179
301	1,02	5,7	0,179
311	0,99	5,4	0,183
337	1,03	5,6	0,184
267	0,88	4,9	0,18
279	0,97	5,4	0,18
299	1,13	6,2	0,182
309	0,95	5,2	0,183
302	0,97	5,4	0,18
322	0,9	5	0,18
354	0,98	5,4	0,181
371	1	5,5	0,182



Figura 5.1- Carotes provenientes da camada de ligação AC 20 bin 35/50 (MB)

5.2. Procedimento de ensaio

De modo a obter-se uma gama de resultados o mais variada e completa possível, dado o número limitado de provetes disponíveis, optou-se por proceder ao ensaio das amostras utilizando combinações de três temperaturas diferentes (35°C, 50°C, e 65°C), e de três velocidades de carregamento diferentes (0,1mm/s, 1mm/s, e 5mm/s).

Cada ensaio consistiu no carregamento uniaxial de cada amostra até à rotura. O ensaio considera-se completo quando o provete atinge o seu ponto de cedência, procedendo-se então ao registo da tensão a que este estava sujeito quando cedeu, sendo possível proceder-se a uma avaliação da variação deste valor de resistência quando as misturas estão sujeitas a diferentes condições de temperatura e de velocidade de carregamento.

Para a identificação do início da fase de rotura do provete ou do ponto de cedência foi selecionado, para a curva tensão – deformação de cada provete, o ponto em que aquela deixa de aumentar, enquanto continua a ser registado um acréscimo de deformação. Deste modo, para um provete a ser carregado, se este estiver a ser deformado mas não se verificar um aumento correspondente de tensão, significa que já atingiu a cedência.

Foram ensaiados 14 amostras de cada camada. A relação das amostras ensaiadas a cada velocidade e temperatura apresenta-se no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Velocidades e Temperaturas de ensaio de cada amostra

Camada de Ligação			Camada de Desgaste		
amostra	T (°C)	Vel. (mm/s)	amostra	T (°C)	Vel. (mm/s)
54	35	0,1	339-324	35	0,1
247			370-316		
128		1	302-322		1
131		5	326-318		5
159			344-332		
249			348-351		
243	50	0,1	279-267	50	0,1
251		5	299-309		5
59	65	0,1	320-342	65	0,1
253			346-314		
254			356-365		
141		1	354-371		1
138		5	301-290		5
250			311-337		

5.3. Resultados obtidos

5.3.1. Fendilhação observada

Durante os ensaios de carga para avaliação da resistência à rotura observa-se um gradual aumento do dano nos provetes. Esta progressão de dano pode ser dividida em duas fases, correspondendo a primeira ao início do fendilhamento, observando-se o aparecimento de fendas do tipo “cabelo” (Murtinheira 2011), e a segunda que ocorre aquando a rotura, observando-se nesta um aumento do número de fendas e alargamento das mesmas (figuras 5.2 e 5.3) , podendo culminar, particularmente quando em condições de temperatura elevada, na completa desagregação de uma das faces do provete (figura 5.4).



Figura 5.2- Aspecto da amostra nº251 após ensaio

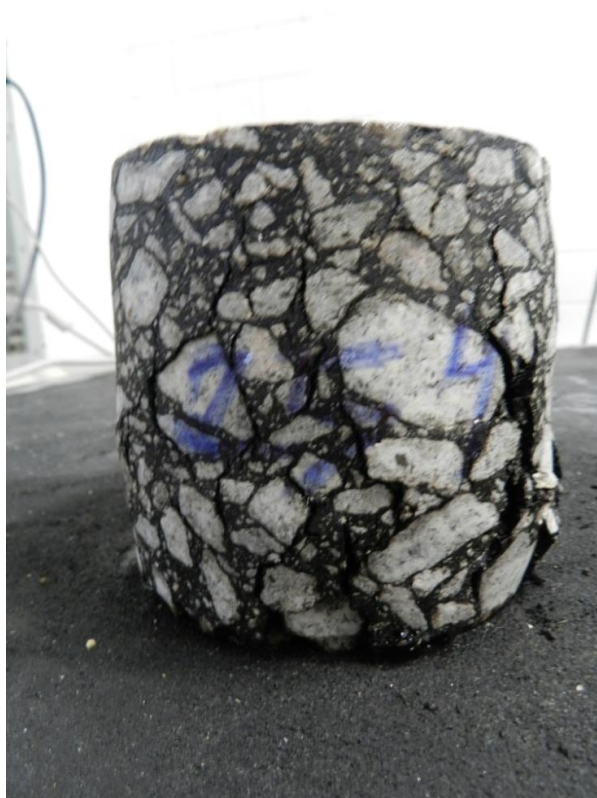


Figura 5.3- Aspecto da amostra nº 254 após ensaio

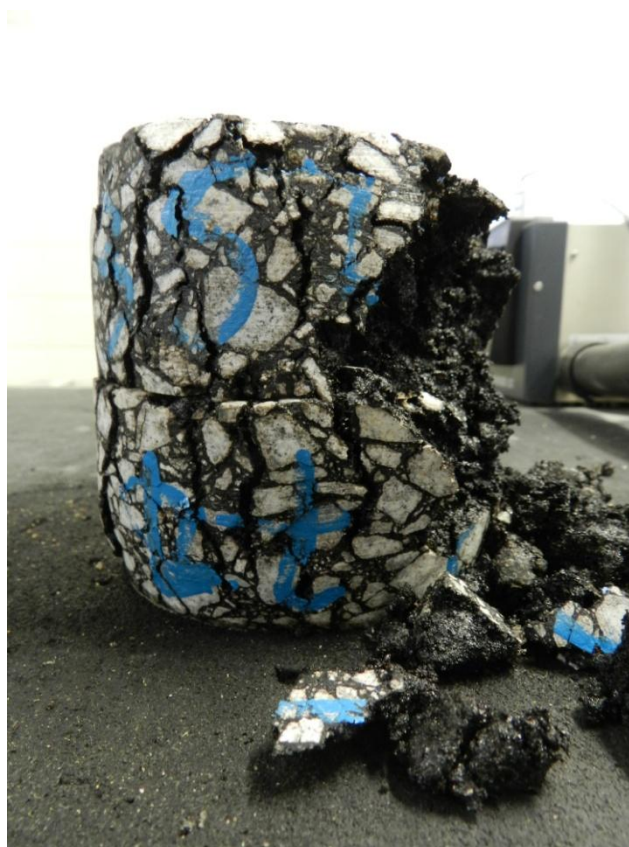


Figura 5.4- Aspeto da amostra nº 354-371 após ensaio

5.3.2. Comportamento tensão-deformação

Durante os ensaios de carga para avaliação da resistência à rotura foi medida a tensão aplicada e a deformação resultante, elaborando-se os gráficos correspondentes aos resultados obtidos, apresentando-se estes elementos no Anexo B. Na Figura 5.5 ilustra-se um dos resultados obtidos.

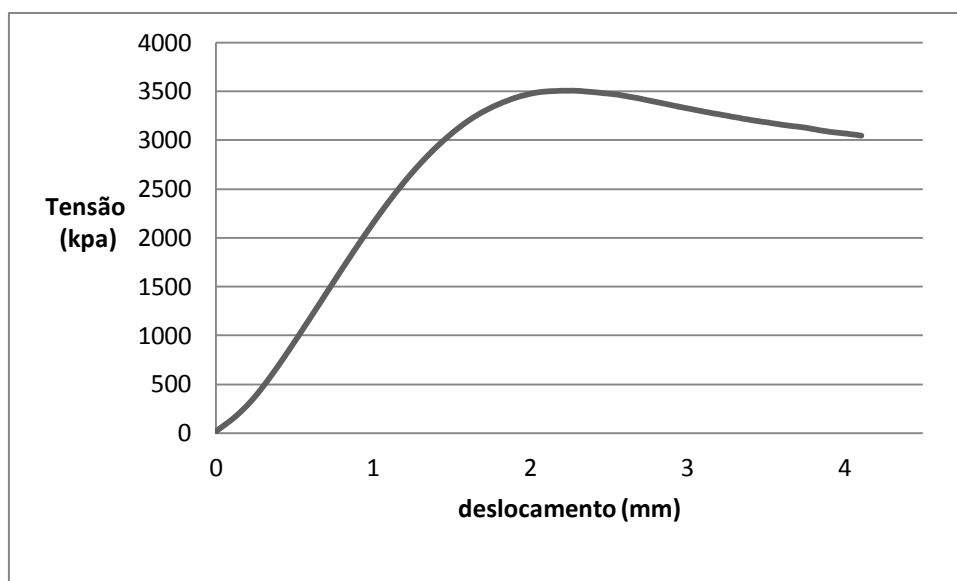


Figura 5.5- Comportamento da amostra nº 54 da camada de ligação a 35°C e 0,1mm/s

5.3.3. Tensão de rotura

Com base nos diagramas representando o comportamento tensão-deformação foi deduzida a tensão de rotura, correspondendo ao valor máximo de tensão no diagrama.

Os valores de tensão de rotura foram agrupados por temperatura e velocidade de carregamento, sendo calculado o valor médio de cada grupo. Desta maneira, obtiveram-se três pontos que permitiram formar a linha de comportamento do material quando submetido a estas condições, que se apresentam nas Figuras 5.6 e 5.7.

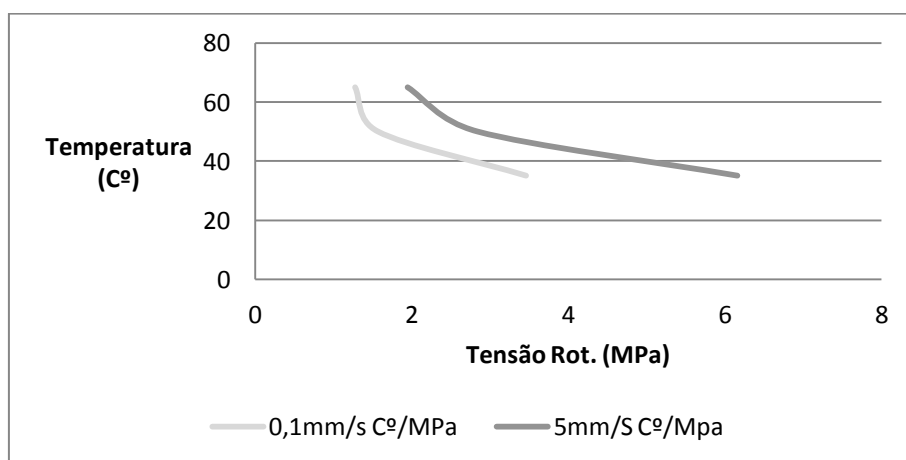


Figura 5.6– Resultados Camada de Ligação

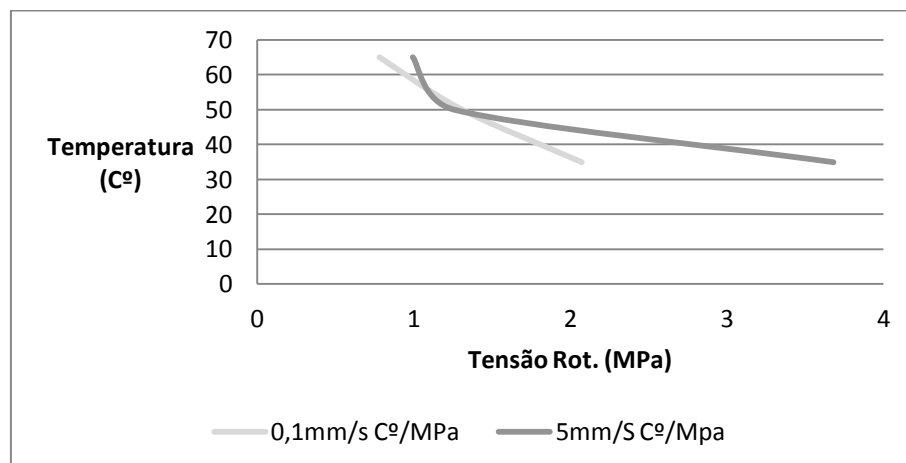


Figura 5.7- Resultados Camada de Desgaste

De notar que, devido ao facto de se possuir apenas dois ensaios correspondentes à velocidade intermédia (1mm/s), feitos cada um a uma determinada temperatura (35 e 65°C), foi decidido desprezar estes valores, devido ao risco de não serem representativos do comportamento aproximado das misturas que se obtém a partir da média feita a partir de um número mais elevado de ensaios.

Os fatores relacionados com a composição de cada mistura explicarão as diferenças de resistência verificadas entre o grupo de provetes proveniente da camada de desgaste (mistura AC 14 surf 35/50 (BB)) e o grupo proveniente da camada de ligação (mistura AC 20 bin 35/50 (MB)). O segundo grupo apresenta em geral valores de resistência à rotura superiores ao primeiro.

Um dos fatores da categoria da composição de mistura que é necessário considerar para explicar estas diferenças de comportamento seria o tipo e a quantidade de betume. No entanto, foi utilizado betume 35/50 em ambos os grupos ensaiados.

Contudo a percentagem de ligante é inferior na mistura da camada de ligação do que na da camada de desgaste (4,5% versus 5%) e registam-se diferenças significativas nas porosidades (5,6% versus 3,3%). Assim considera-se que a composição volumétrica das misturas teve influência determinante nos resultados obtidos.

Por outro lado a composição da camada de ligação apresenta uma maior percentagem de britas em comparação com os da camada de desgaste. Assim, da composição daquelas misturas, 57,3% dizem respeito a britas, enquanto que na composição da camada de desgaste estão incluídas 55%. Embora aparente ser uma diferença pequena, é de notar que na composição da camada de ligação estão presentes britas de granulometria bastante superior, neste caso 14,3% de Brita 16/22,4mm, categoria de agregado ausente das camadas de desgaste. Analogamente, na composição dos provetes desta camada está presente uma grande significativa percentagem da

brita de baixa granulometria (Brita 2/6,3 a 18%), enquanto que este agregado importa apenas 9,6% da camada de ligação.

Admite-se, assim, que as diferenças de comportamento observadas entre as amostras da camada de desgaste e da camada de ligação resultam da composição volumétrica das misturas bem como do tipo de agregado utilizado.

6. Considerações finais

6.1. Conclusões

É conhecido o facto de as propriedades mecânicas das misturas betuminosas, em particular a sua resistência à rotura, serem condicionadas por diversos fatores. Estes em geral podem ser agrupados em duas categorias, a de fatores relacionados com as condições de ensaio, e a dos fatores relacionados com a própria composição de cada mistura (Di Benedetto et al., 1998).

No presente trabalho a variação dos fatores da primeira categoria está representada pelas diferentes temperaturas de ensaio, bem como das diferentes frequências de carregamentos efetuados. A temperatura e a frequência de ensaio são dois parâmetros muito importantes desta categoria. Segundo Kim et al. (1995), a frequência tem menor influência na resistência do material quando este está submetido a temperaturas elevadas, enquanto que o fator frequência será mais preponderante quando em presença de um carregamento a temperaturas mais baixas.

As observações registadas a partir dos ensaios efetuados parecem confirmar estes dados. Assim, verifica-se uma maior diferença de valores de tensão de rotura para os provetes ensaiados a temperaturas mais baixas, e a diferentes gamas de frequência, do que a temperaturas mais altas. Este facto resultará da influência acrescida que a frequência possui quando o provete está a ser carregado a uma baixa temperatura (35°C)..

De notar que de acordo com os autores mencionados as conclusões referidas são apenas válidas para temperaturas entre os -10°C e os 50°C, o que deve impossibilitar analisar de forma semelhante as diferenças obtidas para maior temperatura (65°C). No entanto, parece poder-se concluir que, a essa temperatura, o valor de resistência de ambas as gamas de amostras aproxima-se pelo que o fator frequência de carregamento sofre uma diminuição de importância com o aumento de temperatura.

Os resultados obtidos neste trabalho, embora correspondendo a um número limitado de ensaios, contribuem para uma avaliação do comportamento visco-plástico de misturas betuminosas tradicionalmente aplicadas em Portugal. Este conhecimento servirá para melhorar o conhecimento dos mecanismos de deformação permanente e permite a elaboração de cálculos de previsão de roturas atendendo às condições de temperatura.

6.2. Perspetivas para desenvolvimentos futuros

Pretendeu-se desenvolver uma metodologia adequada, que utilizando os recursos e o equipamento disponível, permitisse recolher informação sobre a resistência à rotura e sobre os parâmetros que definem o comportamento das misturas betuminosas utilizadas em Portugal.

Os resultados descritos neste trabalho apresentam-se como uma introdução ao tema, devendo este vir a ser continuado, seguindo os procedimentos aqui testados. Um dos principais passos a seguir para dar continuidade a este trabalho é reunir uma adequada biblioteca de resultados obtidos a partir de idênticos ensaios

Relativamente aos ensaios de rotura, a principal limitação deste trabalho foi o reduzido número de amostras de mistura betuminosas testadas, embora os resultados que se obtiveram já permitem obter uma visão geral que se crê estar próxima da realidade. Deste modo, em trabalhos futuros dever-se-á expandir o número de amostras de mistura betuminosas ensaiadas, efetuando particularmente mais ensaios à gama intermédia de temperaturas e velocidade de carga (50°C e 1mm/s).

Será igualmente desejável expandir a gama de temperaturas a que os ensaios são realizados, sugerindo-se também a execução de ensaios a diferentes valores de temperatura, de modo a se obter um panorama o mais completo possível.

De modo a simular de forma mais realista a influência do tráfego, sugere-se que se proceda à execução de ensaios cíclicos até à rotura, recolhendo-se deste modo informação sobre a resistência do material quando sujeito a este tipo de esforços.

Em relação aos ensaios cíclicos, dever-se-á da mesma maneira expandir a gama de resultados recolhidos aqui a partir de ensaios de mais misturas, a diferentes temperaturas, tanto mais altas e mais baixas, e diferentes frequências de carga.

Recomenda-se particularmente que se proceda a ensaios com velocidades de carregamento mais altas do que as que foram já efetuadas, de modo a ser possível simular a passagem do tráfego de forma realista. A utilização de uma frequência de carregamento mais baixa iria, de igual modo, possibilitar o uso de uma metodologia de cálculo de módulo de deformabilidade, como o método de Nottingham, de forma mais adequada.

Sugere-se igualmente que em trabalhos futuros sejam efetuados ensaios a valor constante de carregamento, ao invés de apenas ensaios de carga crescente, pela razão indicada.

Bibliografia

Antes, P., Van Dommelen, A., Houben, L., Molenaar, A.; Parajuli, U. - “Stress Dependent Behaviour of Asphalt Mixtures at High Temperatures”, *Proceedings of the Technical Sessions*, vol 72, pp 173-195, *Asphalt Paving Technology*, 2003

Barrão, L. – “Avaliação do Comportamento de Misturas Betuminosas sob Temperaturas Elevadas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2011

Berhanu, F. – “Analysis and Modeling of Rutting for Long Life Asphalt Concrete Pavemnet”. Universidade Técnica de Darmstadt, 2009.

Böhrnsen, J., Zahid, M.; Kebriaei, R. – “Lecture Notes on Constitutive Material Models”, Universidade Técnica de Braunschweig, 2010

Branco, F., Pereira, P. ;Santos, L. – “Pavimentos Rodoviários” Lisboa: Almedina 2011

Brown, S, Brunton, J. – “An Introduction to the Analytical design of Bituminous Pavements”, 3ª edição, Universidade de Nottingham, 1990

CEN “Bituminous mixtures – Test methods for Mix Asphalt – Part 25: Cyclic Compression Test”.EN 12697-25, European Committee for Standardization, Bussels, 2001

Dey, A.; Basudhar, P. – “Estimation of Burger Model Parameters by Inverse Analysis of Oedometer Data” Recent Trends in Civil Engineering & Technology, Vol.2, Issue 2, pp 27-44, 2012

Di Benedetto, H., De la Roche, C.,; Francken, L. – “State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures, Bituminous Binders and Mixes: State of the Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design”, RILEM Report 17, Ed. L. Francken, London, 1998.

Dunhill, S. – “Quasi-static Characterization of Asphalt Mixtures”, Tese de Doutoramento, Universidade de Nottingham, 2002.

Erkens, S; Poor, M. – “Additional Compression Test – Asphalt Concrete Response (ACRe)”. Report 7-00-117-5, Delft University of Technology, 2000.

Estradas de Portugal. – “Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários. Vol. 2, Gestão da Conservação”, Almada, 2008.

Ferreira, P. – “Prediction of Permanent Deformation in Bituminous Layers of Pavement”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2000.

Freire, A – “Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários”, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 2002.

Gardete, D. – “Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2006.

INIR. – "Directivas para a Concepção de Pavimentos - Critérios de Dimensionamento", 2012.

Kim, Y., Lee, Y. – “Interrelationships Among Stiffnesses of Asphalt-aggregate Mixtures”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 64, AAPT, Portland - Oregon, pp. 575-609, 1995

LNEC – . “EN14 – Chantre/Trofa: Ensaio das Misturas Betuminosas de Alto Módulo Aplicadas nos Trechos Experimentais”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2000.

Lopes, O. – “Misturas Betuminosas – Determinação das Características para o Cálculo dos Pavimentos”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2008.

Mezger, T. – “The Rheology Handbook: for Users of Rotational and Oscillatory Rheometers”, Hannover: Vincentz Network. 2006

Murtinheira, F. ”Reabilitação Estrutural de Pavimentos Rodoviários. Correção do Módulo de Deformabilidade das Camadas Betuminosas”, Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Viseu, 2011.

Nilsson,R., Hopman, P., Isacsson, U. – “Influence of Different Rheological Models on Predicted Pavement Responses in Flexible Pavements” Road Materials and Pavement Design: an International Journal, vol. 3 n° 2 pp117-149, 2002

Portela, E. – “Análise Viscoelástica de Materiais Asfálticos Considerando os Efeitos da Temperatura e do Dano”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2011.

Quaresma, L. - . "Apontamentos de Vias da Comunicação", Universidade Nova de Lisboa, 2010.

Ribeiro, A. - “Modelação Micromecânica do Comportamento do Mastique Betuminoso”, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2011

Soares, A. - “Análise da Ocorrência de Hidroplanagem num Caso Real”, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2008.

Tanaka, E., van Eijden. - “Biomechanical Behavior of the Temporo Mandibular Joint Disc”, *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, vol. 14 no. 2 pp. 138-150, 2003

Uzarowski, L. – “The Development of Asphalt Mix Creep Parameters and Finite Element Modeling of Asphalt Rutting”, Tese de Doutorado, Universidade de Waterloo, 2006

Van der Pöel, C. – “A General System Describing the Visco-elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data”, Journal of Applied Chemistry, vol. 4, 1954

Anexo A – Resultados dos Ensaios Cíclicos

A.1 - Resultados da amostra nº65 da camada de ligação

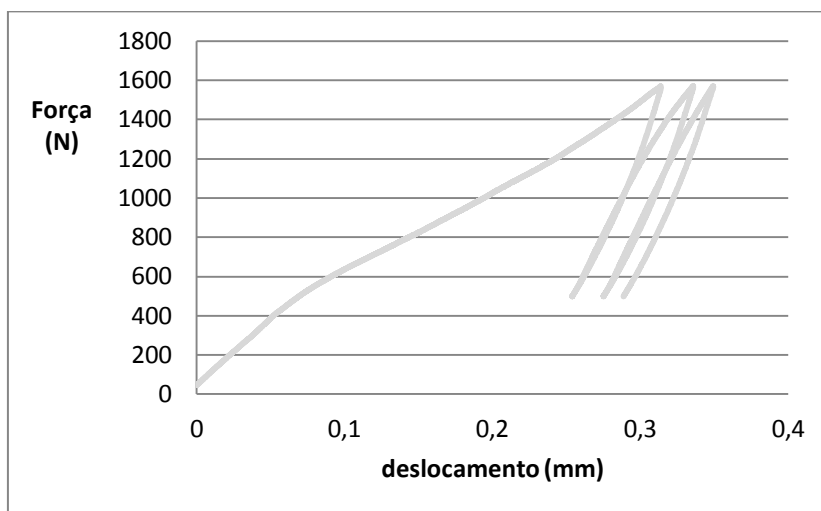


Figura A.1– Comportamento da amostra nº65 a 35°C e 0,05mm/s

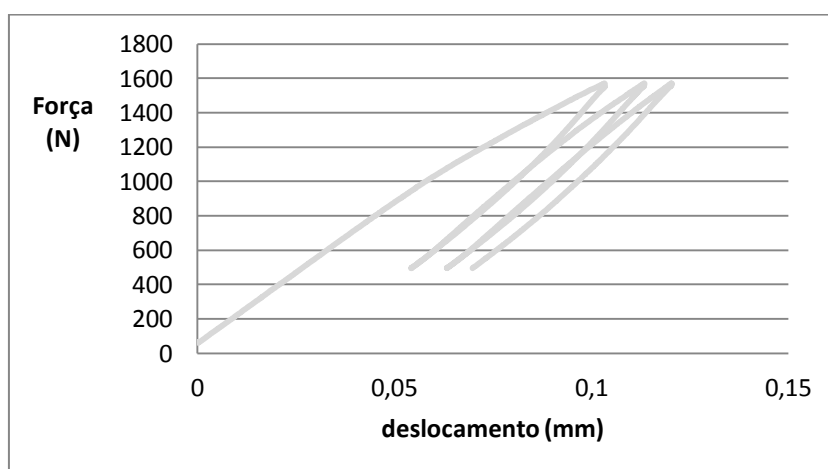


Figura A.2– Comportamento da amostra nº65 a 35°C e 0,1mm/s

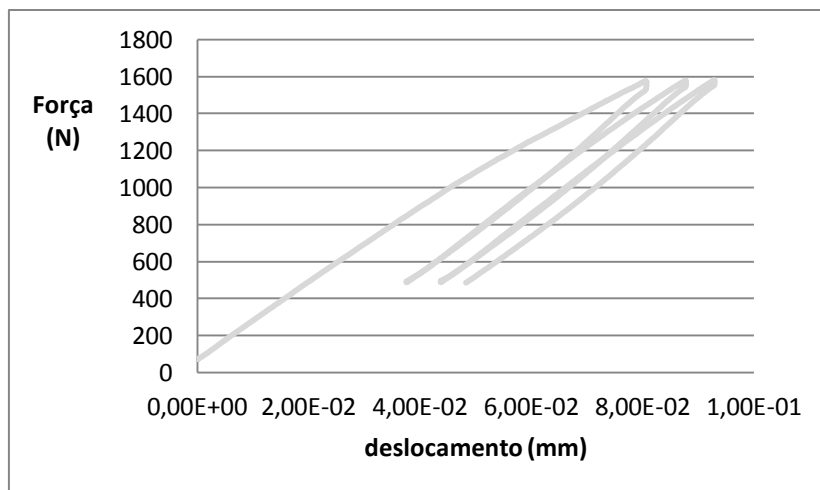


Figura A.3– Comportamento da amostra nº65 a 35°C e 0,3mm/s

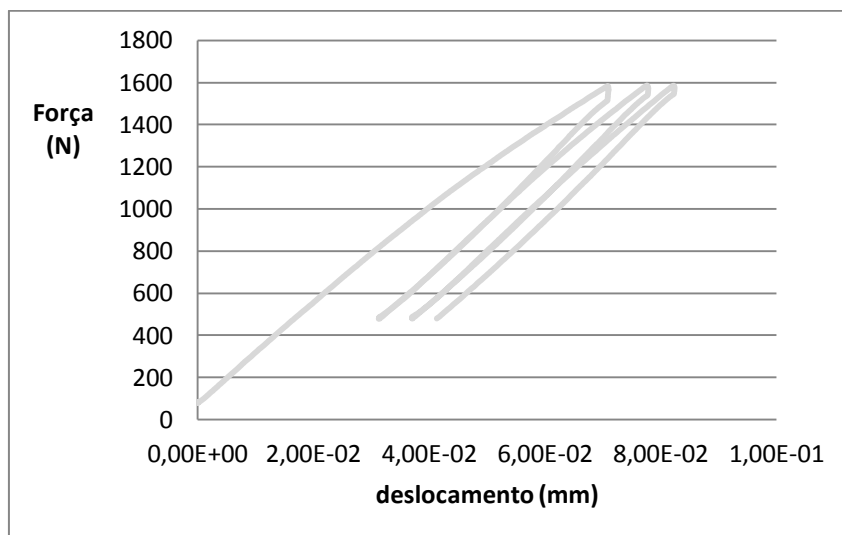


Figura A.4– Comportamento da amostra nº65 a 35°C e 0,5mm/s

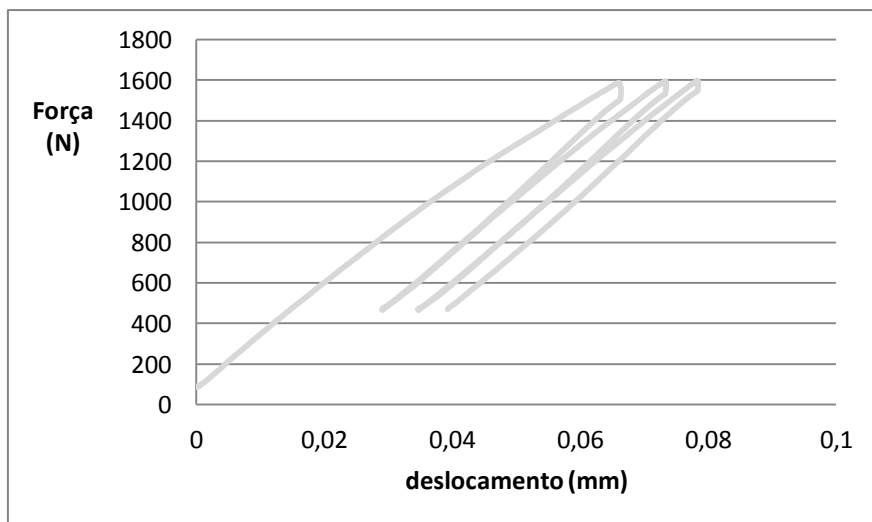


Figura A.5– Comportamento da amostra nº65 a 35°C e 0,7mm/s

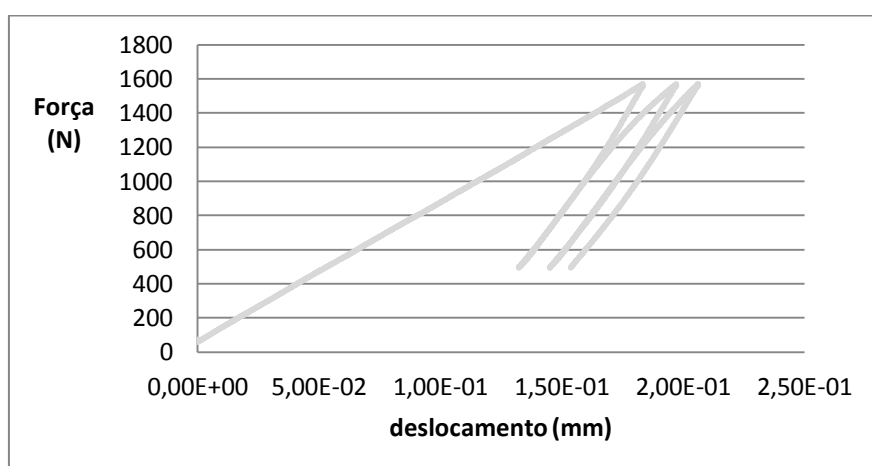


Figura A.6– Comportamento da amostra nº65 a 50°C e 0,05mm/s

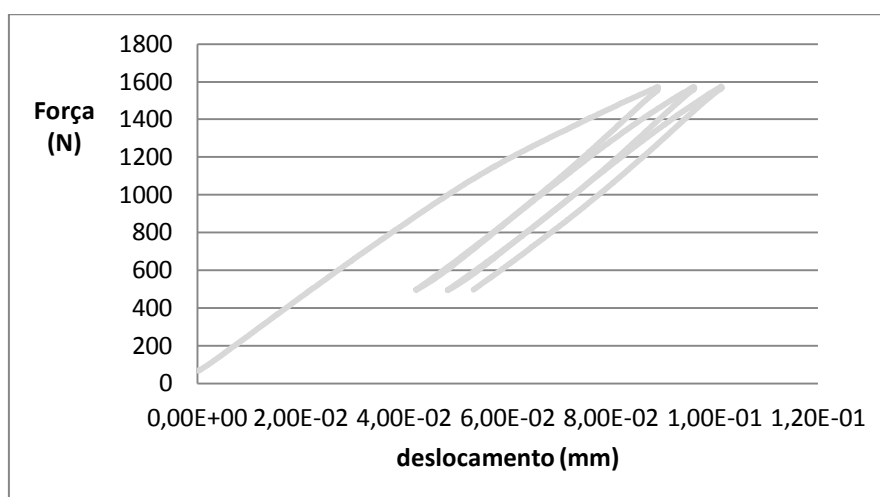


Figura A.7– Comportamento da amostra nº65 a 50°C e 0,1mm/s

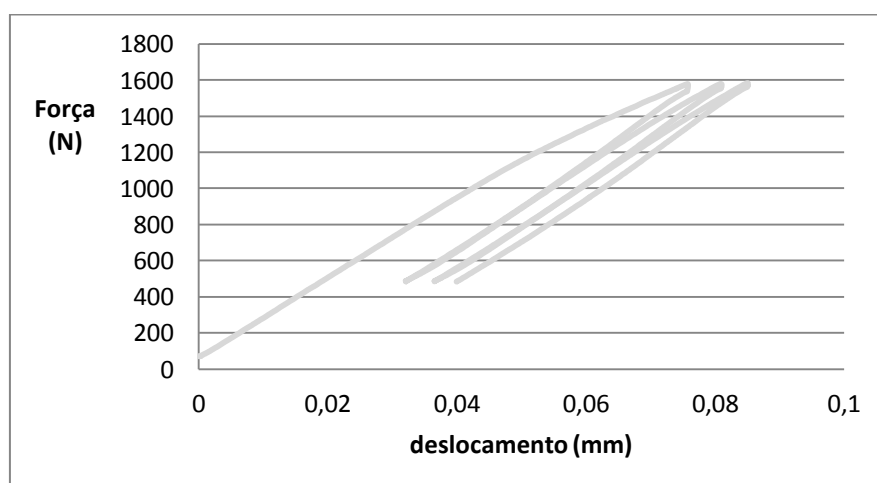


Figura A.8– Comportamento da amostra nº65 a 50°C e 0,3mm/s

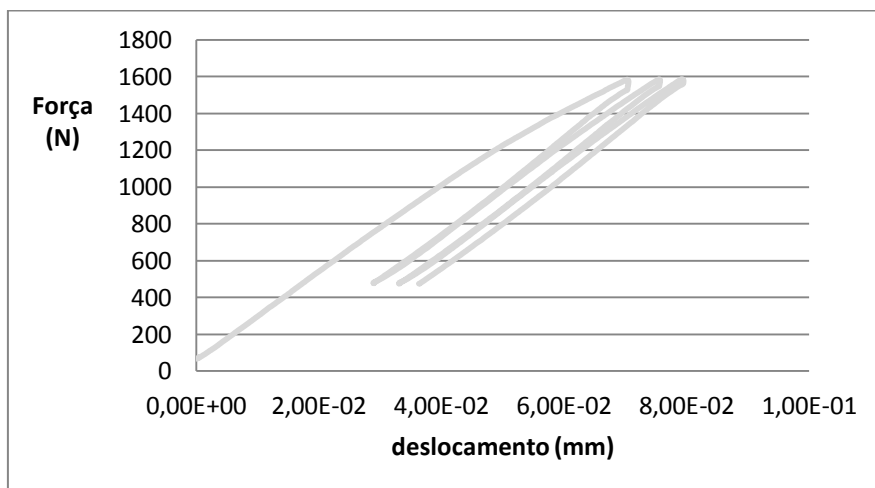


Figura A.9 – Comportamento da amostra nº65 a 50°C e 0,5mm/s

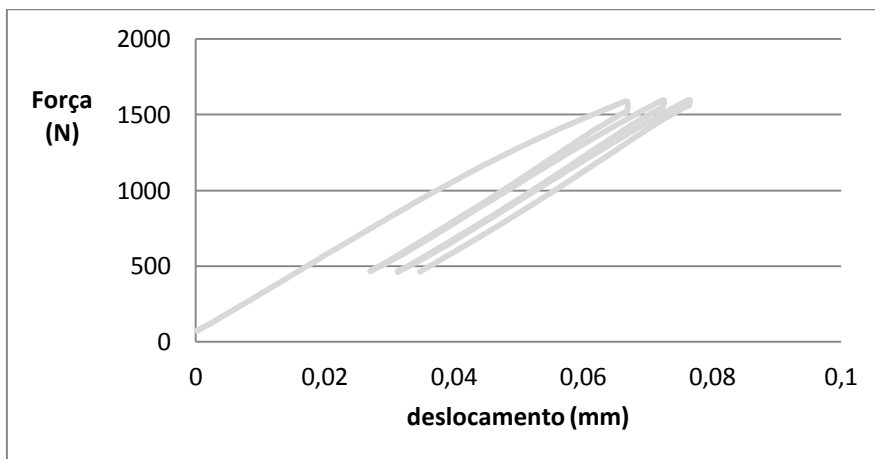


Figura A.10 – Comportamento da amostra nº65 a 50°C e 0,7mm/s

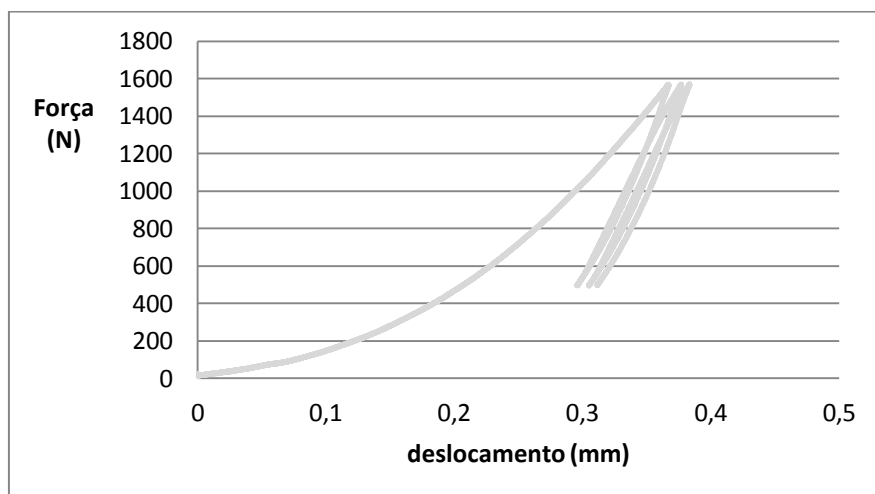


Figura A.11– Comportamento da amostra nº65 a 65°C e 0,05mm/s

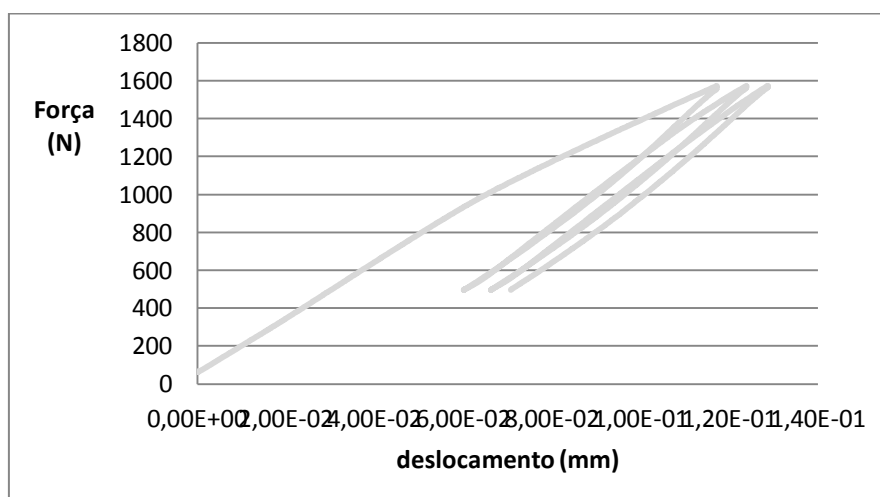


Figura A.12– Comportamento da amostra nº65 a 65°C e 0,1mm/s

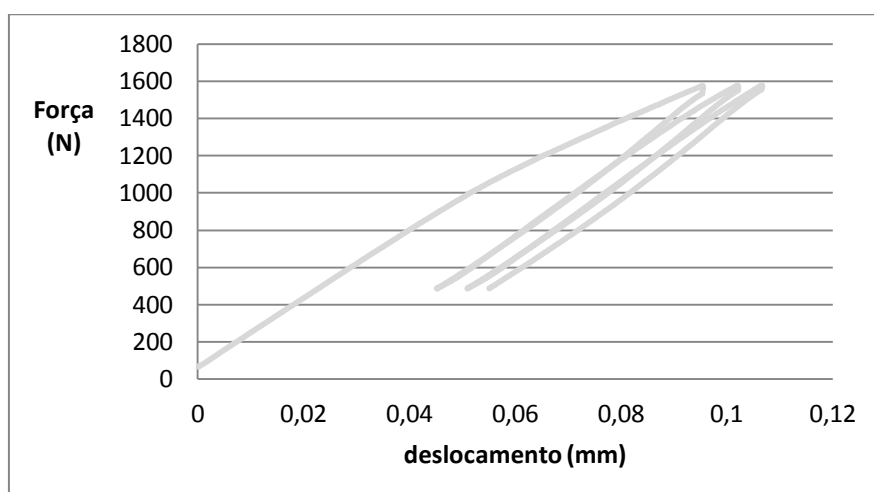


Figura A.13 – Comportamento da amostra nº65 a 65°C e 0,3mm/s

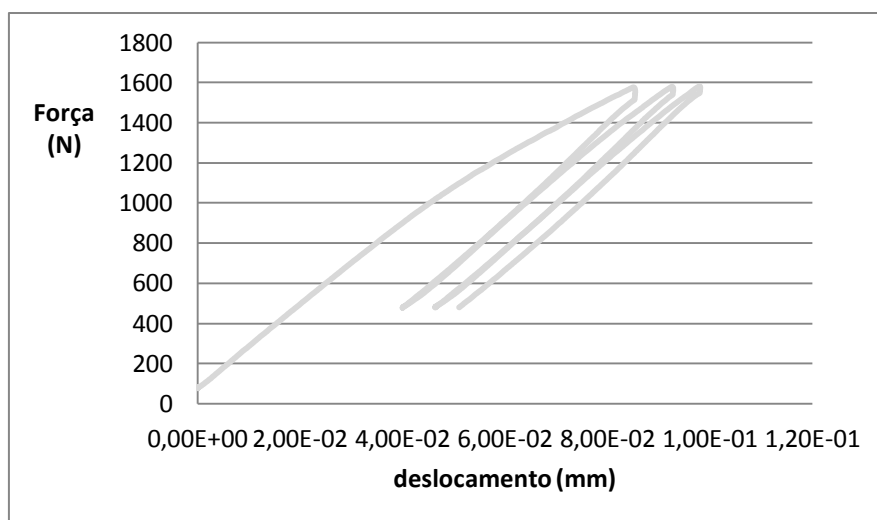


Figura A.14 – Comportamento da amostra nº65 a 65°C e 0,5mm/s

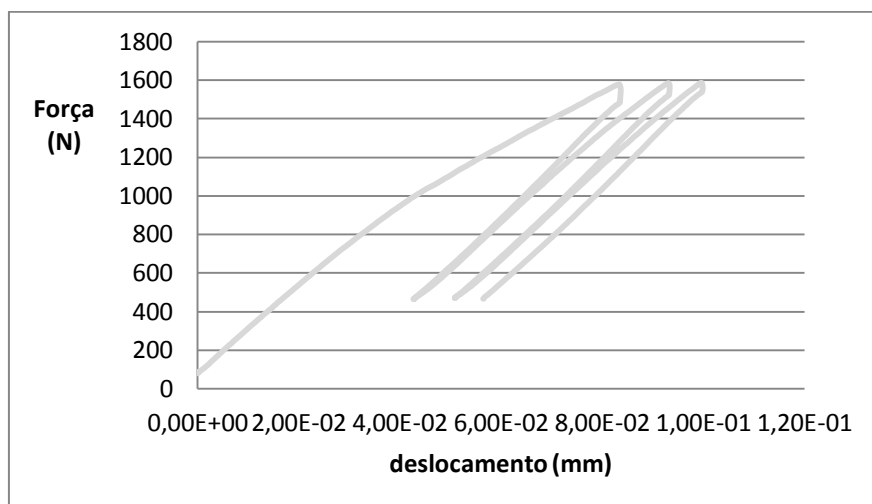
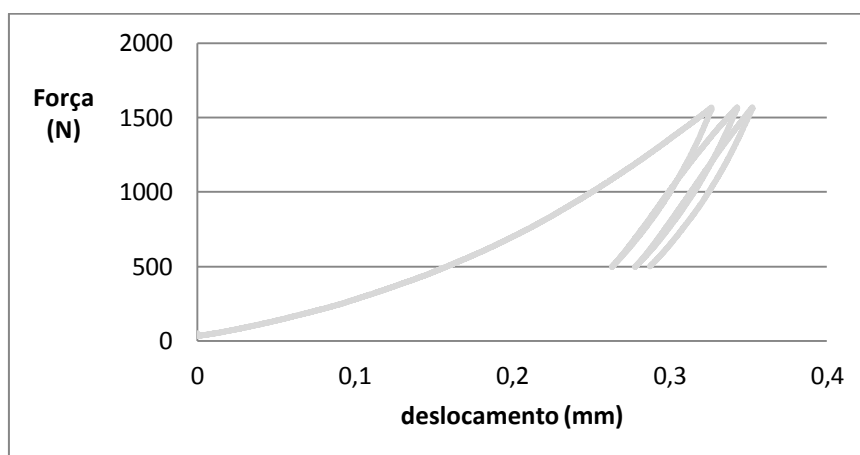
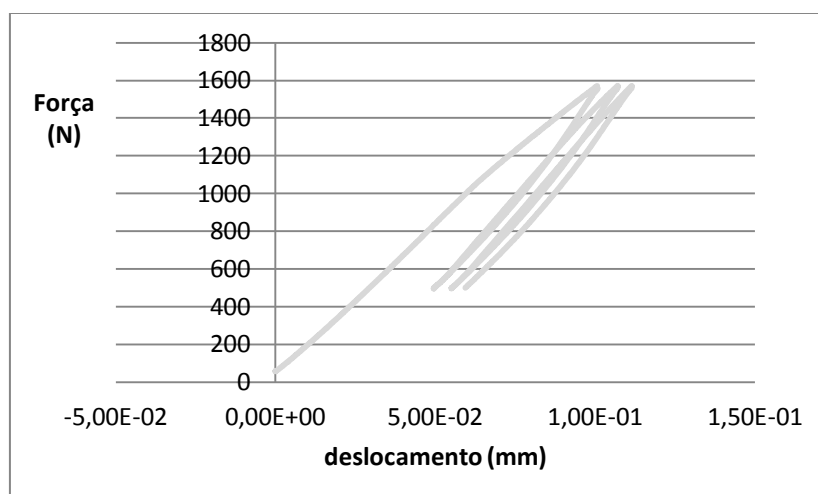


Figura A.15– Comportamento da amostra nº65 a 65°C e 0,7mm/s

A.2 - Resultados da amostra nº152 da camada de ligação**Figura A.16 – Comportamento da amostra nº152 a 35°C e 0,05mm/s****Figura A.17 – Comportamento da amostra nº152 a 35°C e 0,1mm/s**

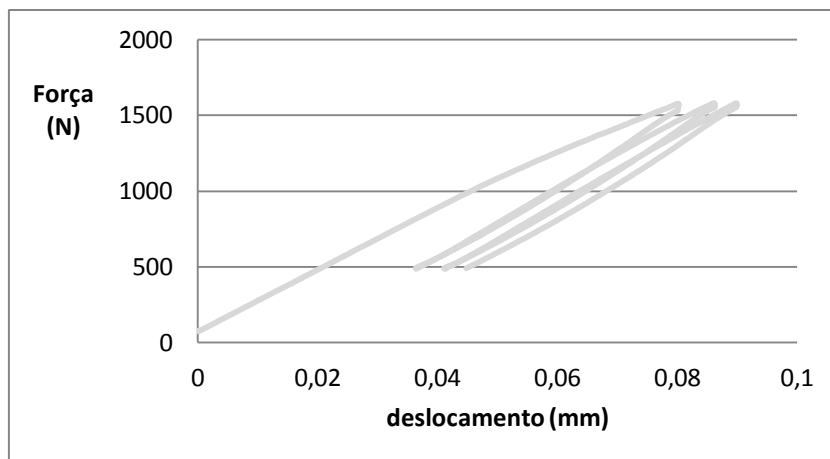


Figura A.18 – Comportamento da amostra nº152 a 35°C e 0,3mm/s

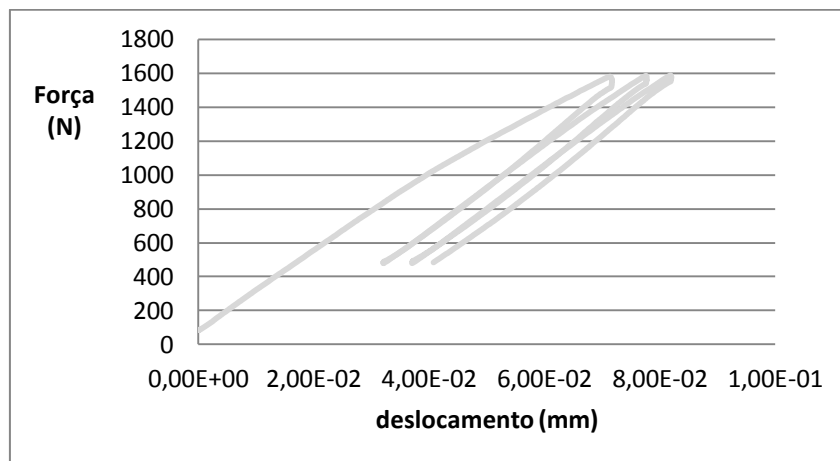


Figura A.19 – Comportamento da amostra nº152 a 35°C e 0,5mm/s

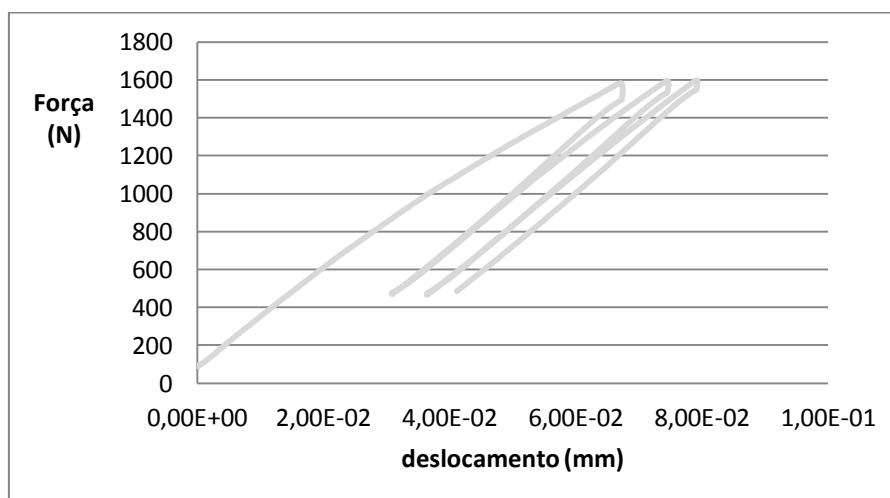


Figura A.20 – Comportamento da amostra nº152 a 35°C e 0,7mm/s

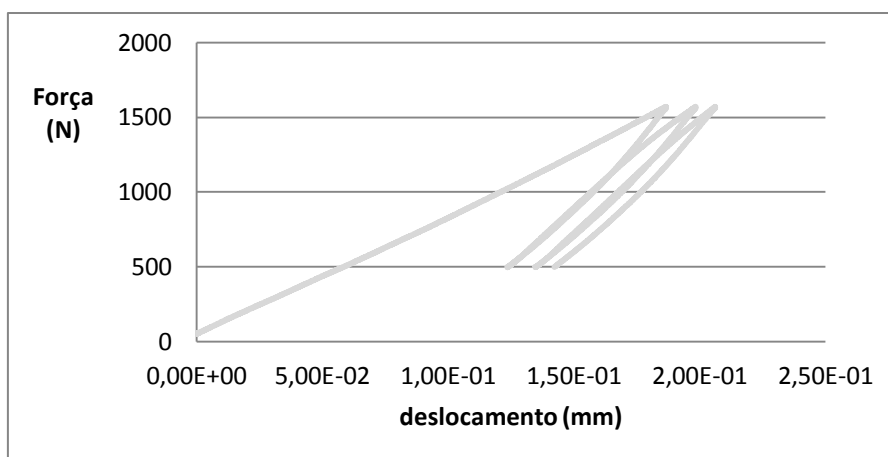


Figura A.21 – Comportamento da amostra nº152 a 50°C e 0,05mm/s

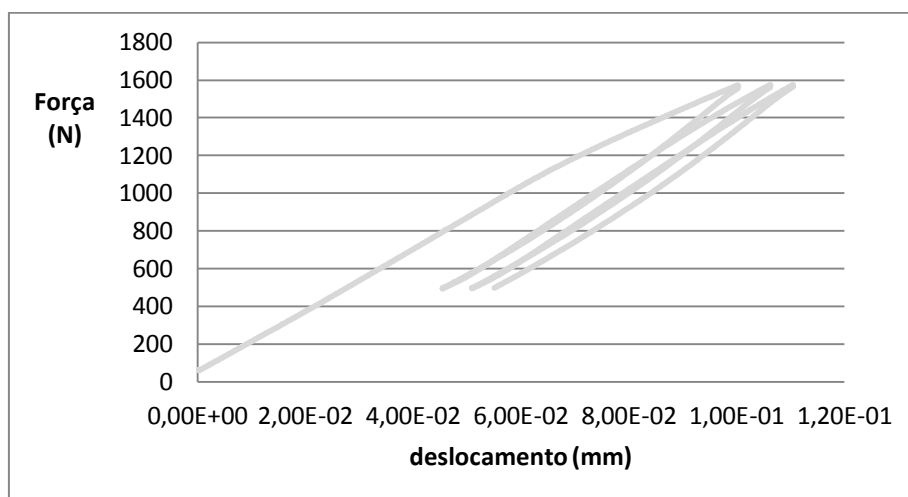


Figura A.22 – Comportamento da amostra nº152 a 50°C e 0,1mm/s

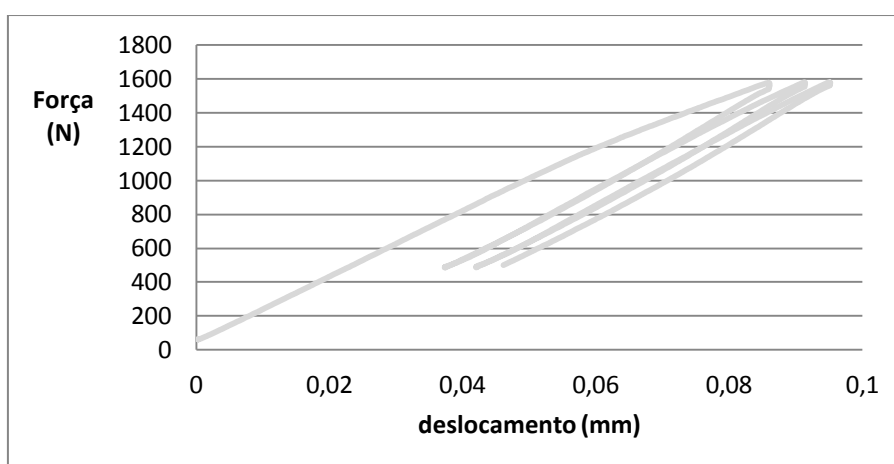


Figura A.23 – Comportamento da amostra nº152 a 50°C e 0,3mm/s

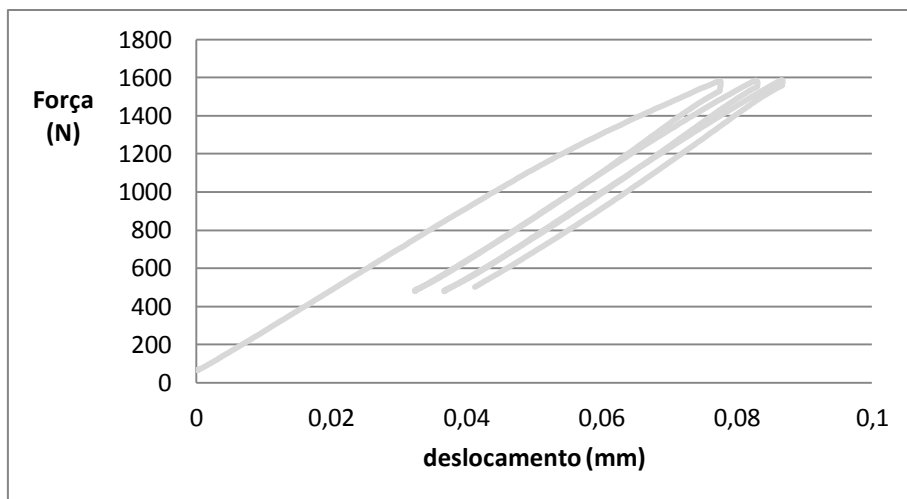


Figura A.24 – Comportamento da amostra nº152 a 50°C e 0,5mm/s

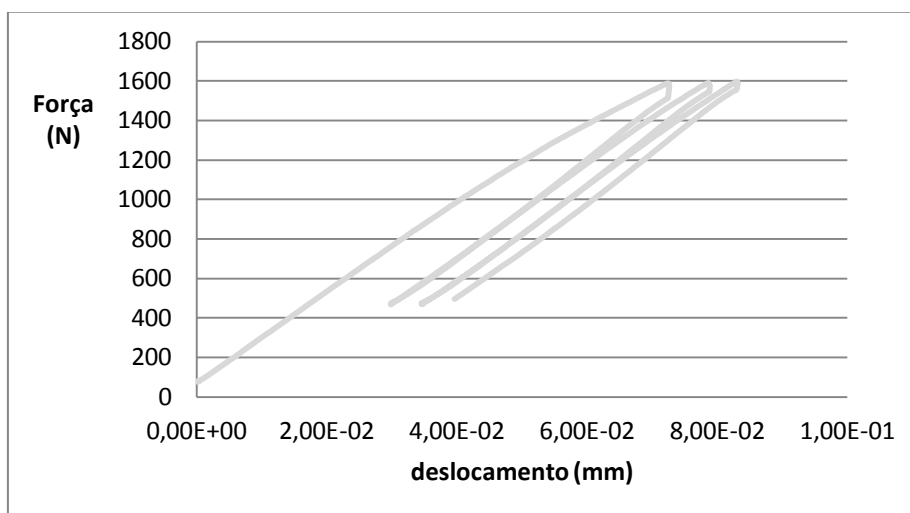


Figura A.25 – Comportamento da amostra nº152 a 50°C e 0,7mm/s

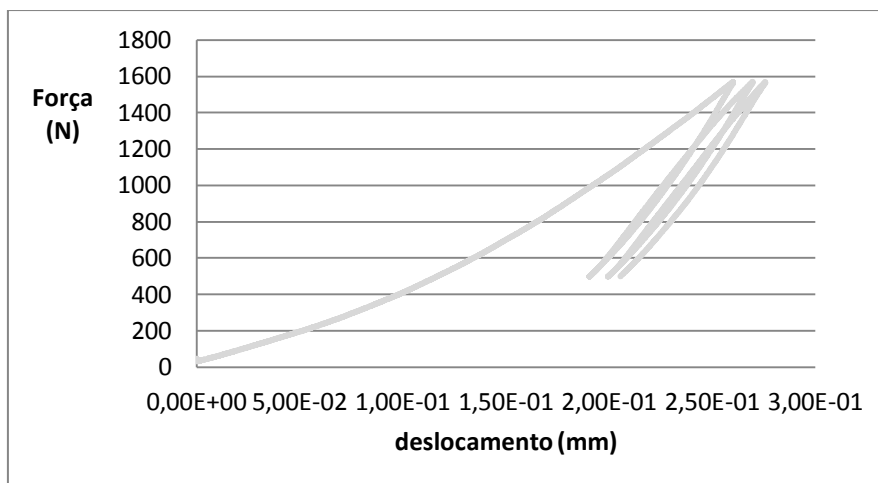


Figura A.26 – Comportamento da amostra nº152 a 65°C e 0,05mm/s

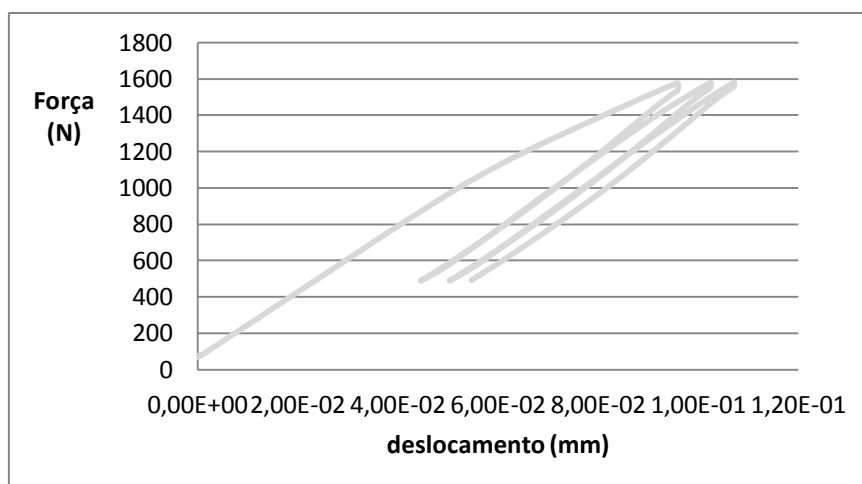


Figura A.27 – Comportamento da amostra nº152 a 65°C e 0,1mm/s

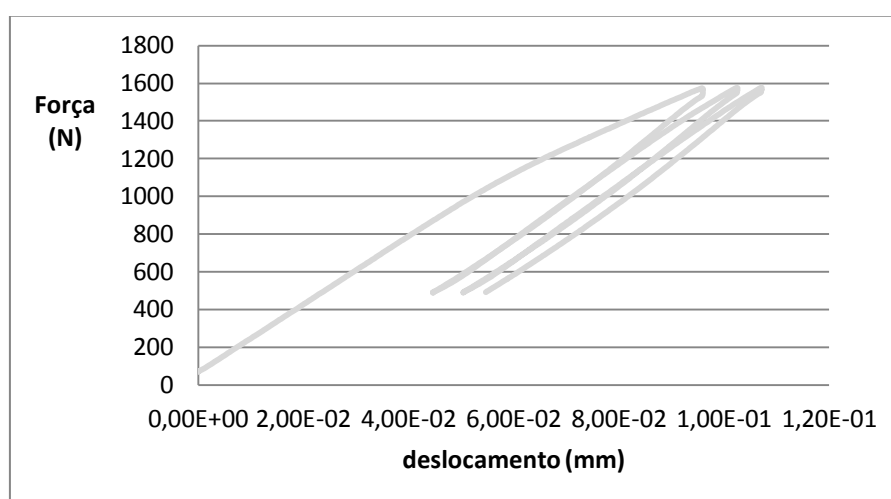


Figura A.28 – Comportamento da amostra nº152 a 65°C e 0,3mm/s

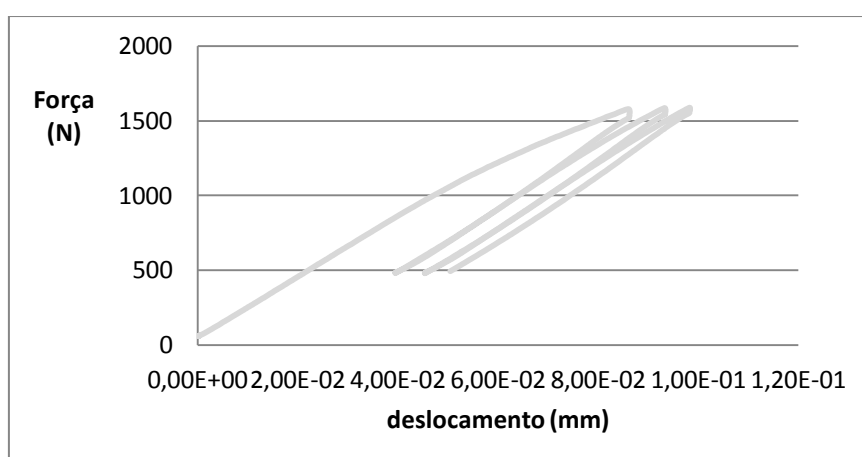


Figura A.29 – Comportamento da amostra nº152 a 65°C e 0,5mm/s

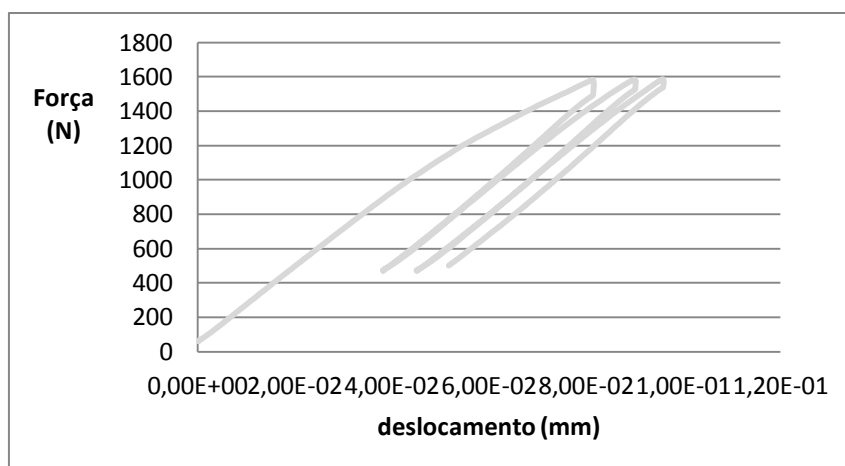


Figura A.30 – Comportamento da amostra nº152 a 65°C e 0,7mm/s

A.3 Resultados da amostra 162 da camada de ligação

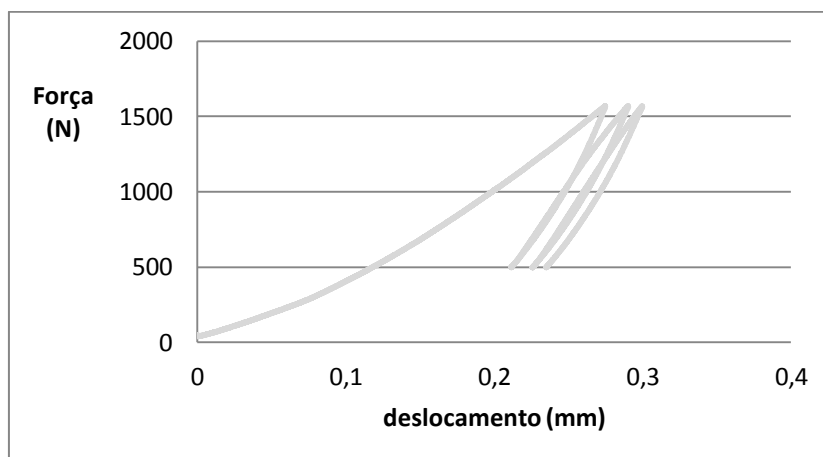


Figura A.31 – Comportamento da amostra nº162 a 35°C e 0,05mm/s

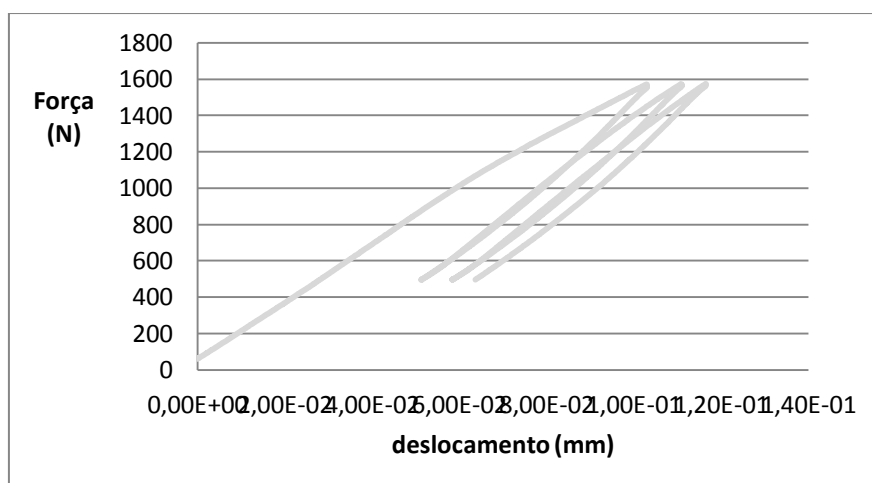


Figura A.32 – Comportamento da amostra nº162 a 35°C e 0,1mm/s

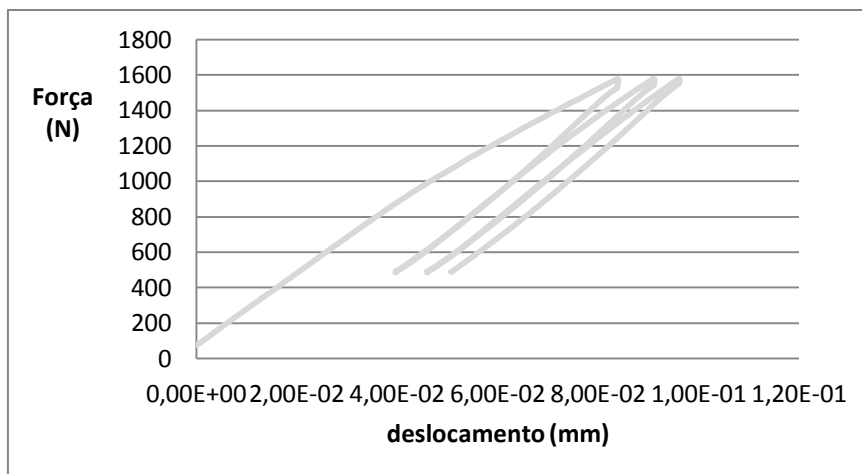


Figura A.33 – Comportamento da amostra nº162 a 35°C e 0,3mm/s

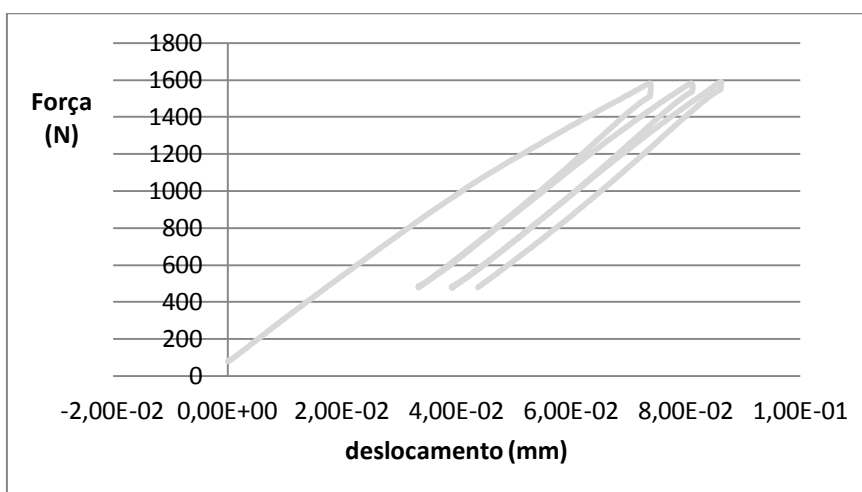


Figura A.34 – Comportamento da amostra nº162 a 35°C e 0,5mm/s

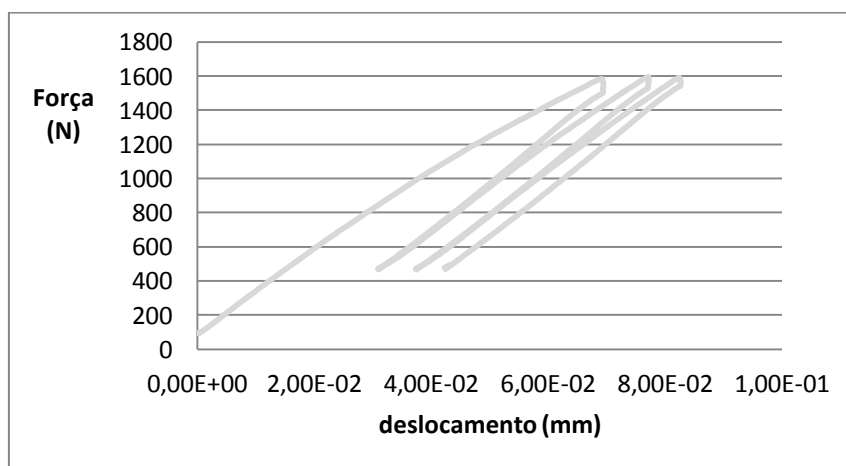


Figura A.35 – Comportamento da amostra nº162 a 35°C e 0,7mm/s

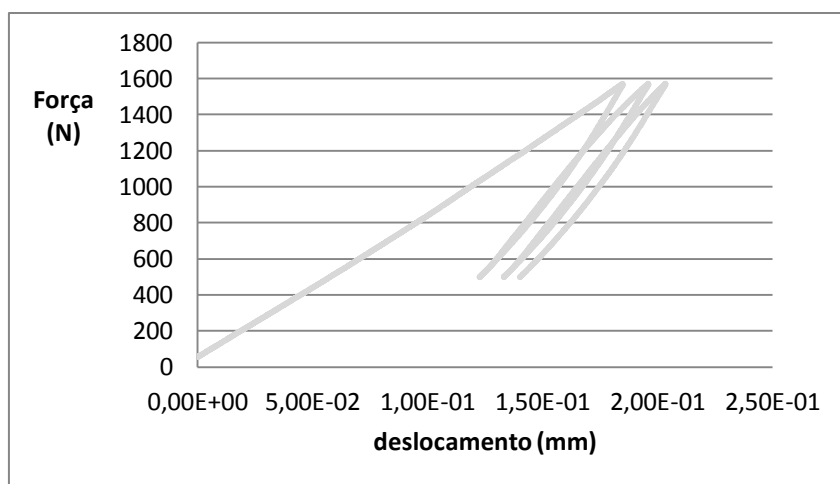


Figura A.36 – Comportamento da amostra nº162 a 50°C e 0,05mm/s

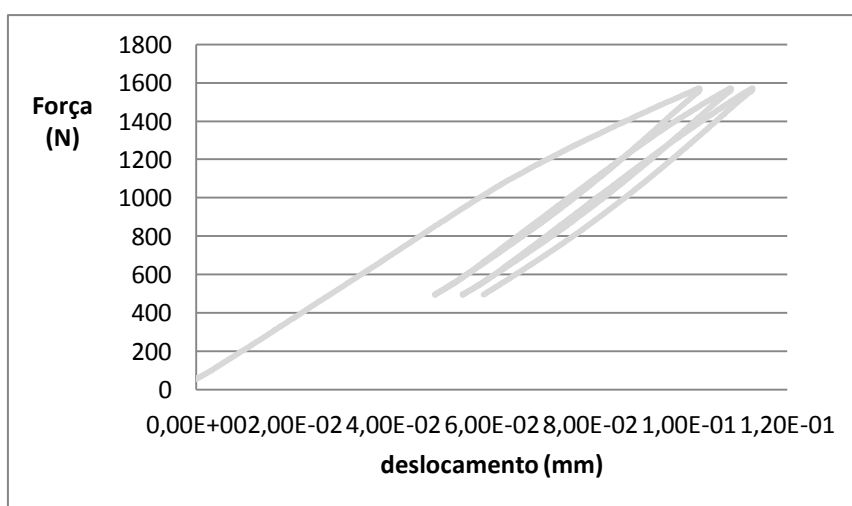


Figura A.37 – Comportamento da amostra nº162 a 50°C e 0,1mm/s

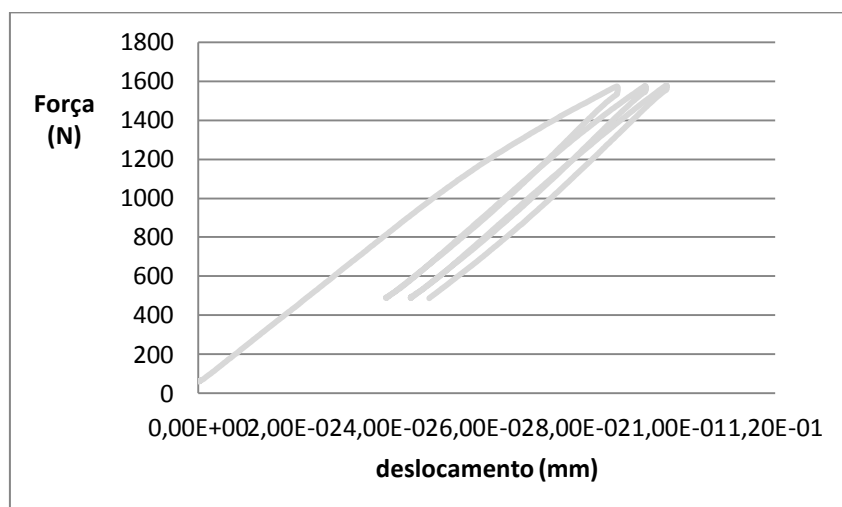


Figura A.38 – Comportamento da amostra nº162 a 50°C e 0,3mm/s

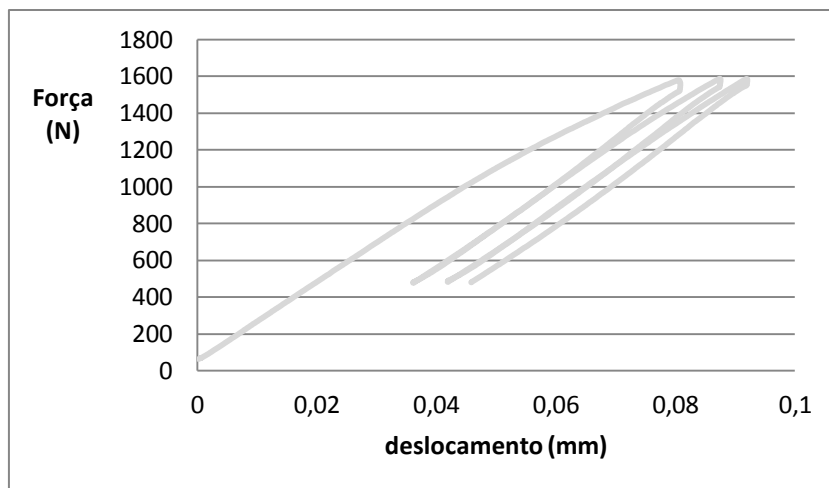


Figura A.39 – Comportamento da amostra nº162 a 50°C e 0,5mm/s

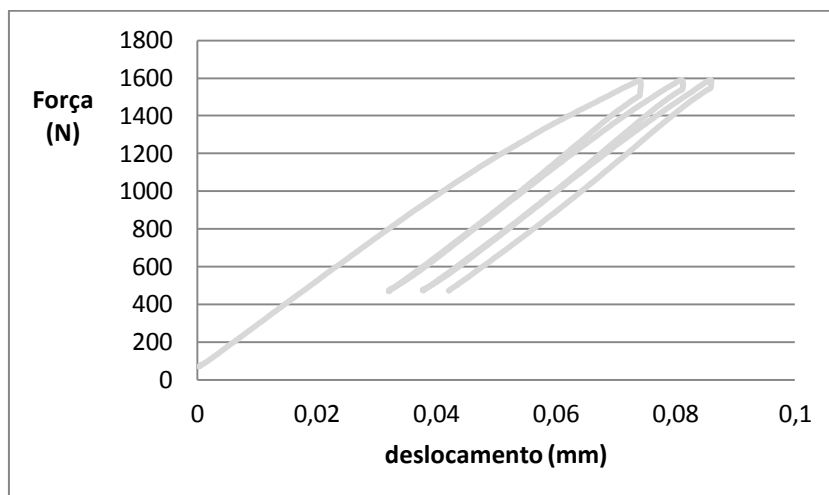


Figura A.40 – Comportamento da amostra nº162 a 50°C e 0,7mm/s

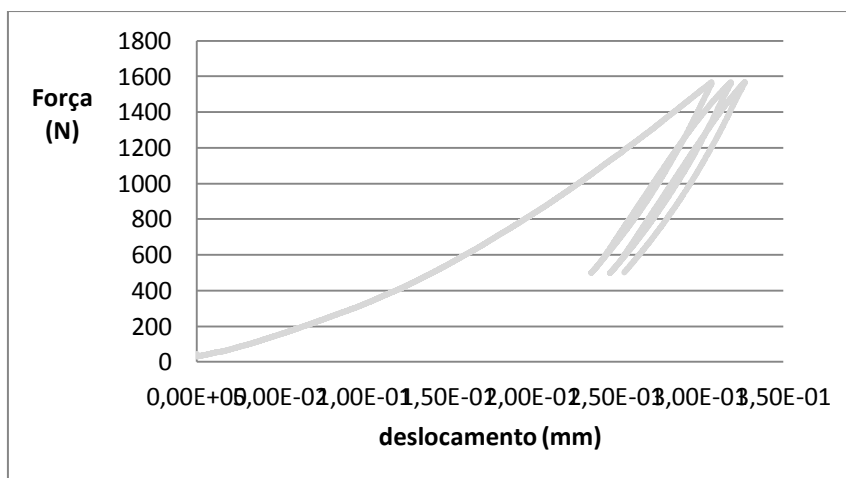


Figura A.41 – Comportamento da amostra nº162 a 65°C e 0,05mm/s

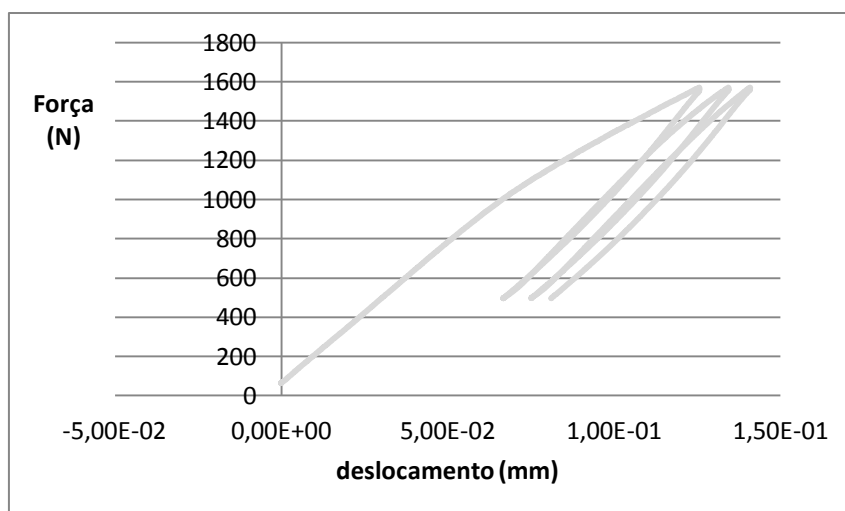


Figura A.42 – Comportamento da amostra nº162 a 65°C e 0,1mm/s

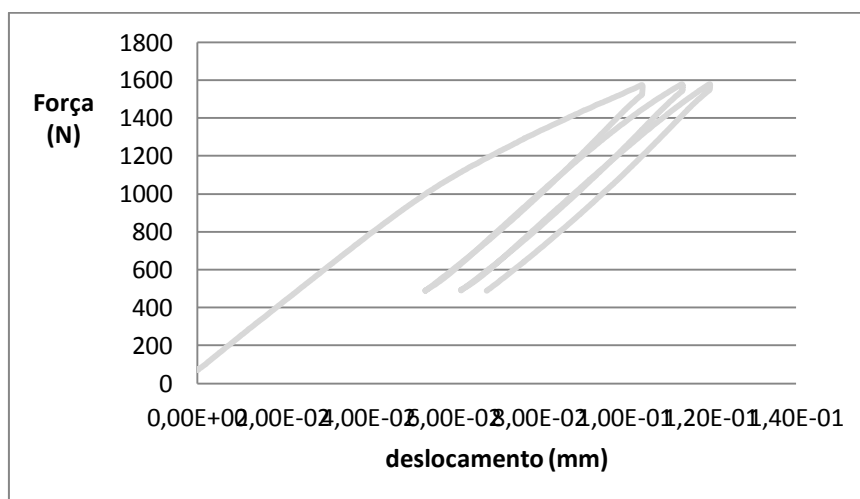


Figura A.43 – Comportamento da amostra nº162 a 65°C e 0,3mm/s

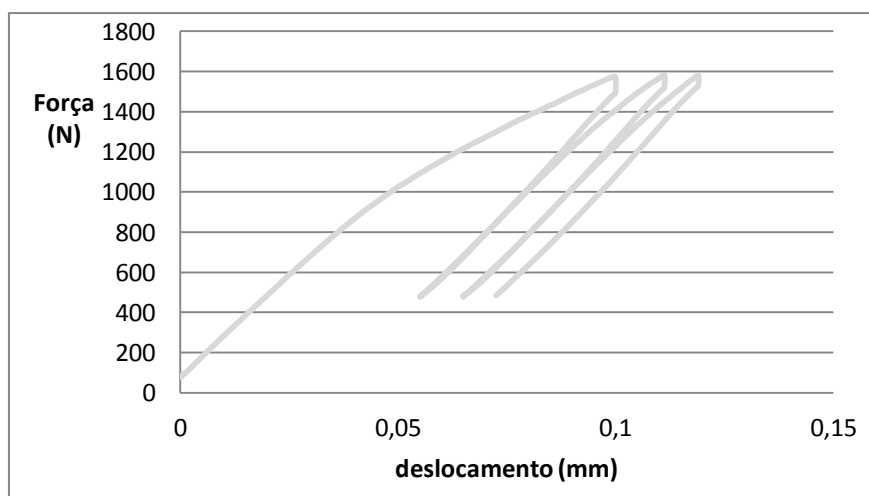


Figura A.44 – Comportamento da amostra nº162 a 65°C e 0,5mm/s

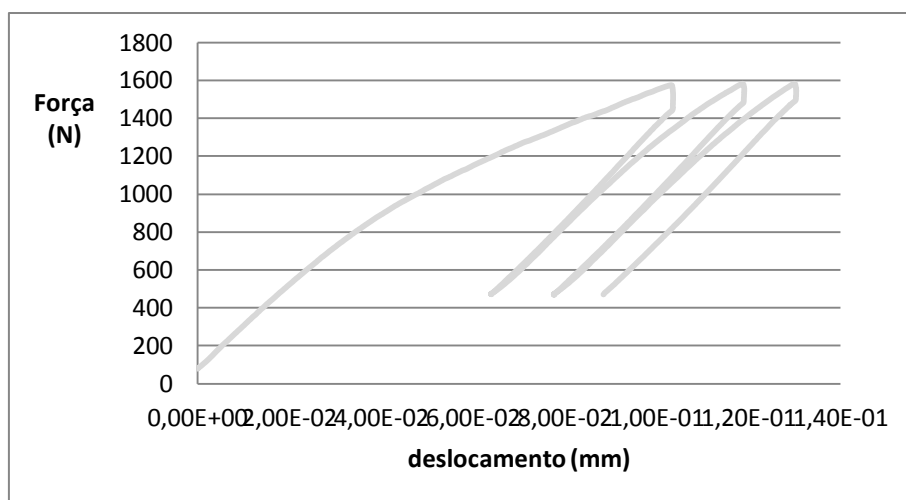


Figura A.45 – Comportamento da amostra nº162 a 65°C e 0,7mm/s

Anexo B – Resultados dos Ensaios de Rotura

B.1 – Resultados Camada de Ligação

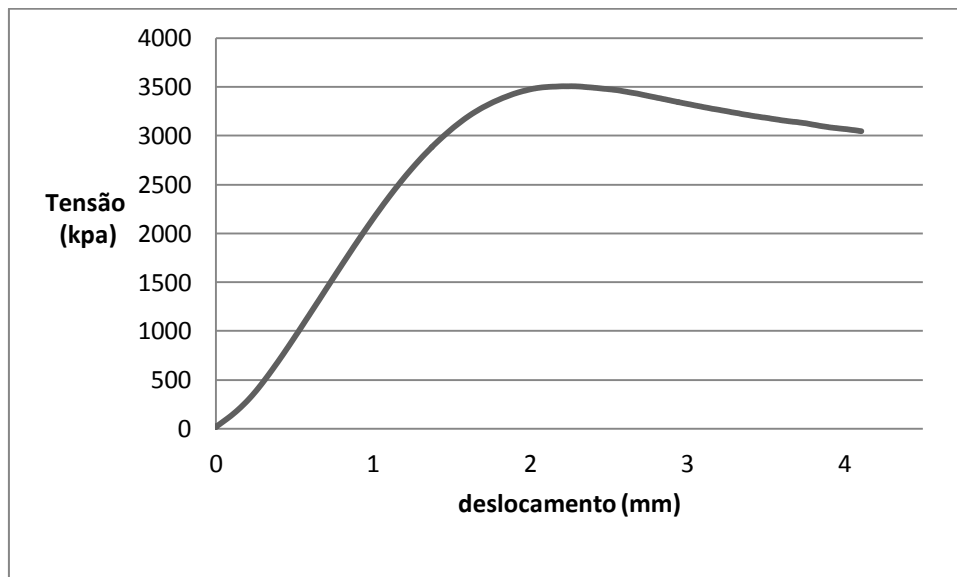


Figura B.1 - Comportamento da amostra nº 54 a 35°C e 0,1mm/s

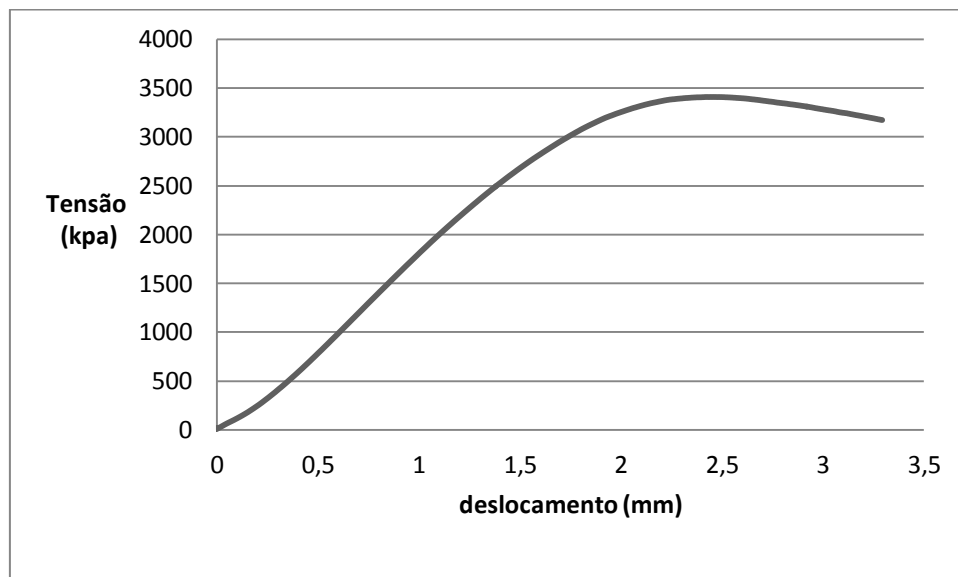


Figura B.2 - Comportamento da amostra nº 247 a 35°C e 0,1mm/s

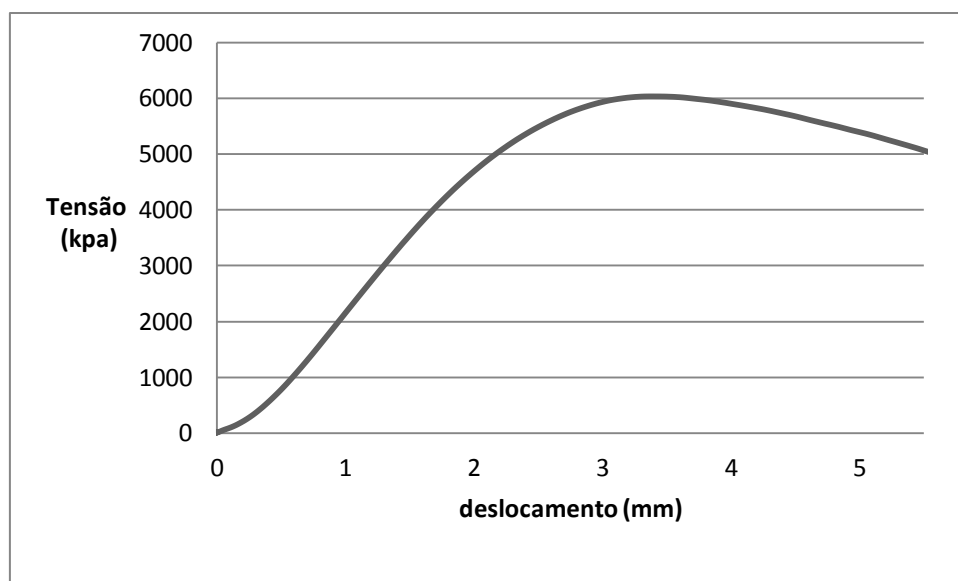


Figura B.3- Comportamento da amostra nº128 a 35°C e 1mm/s

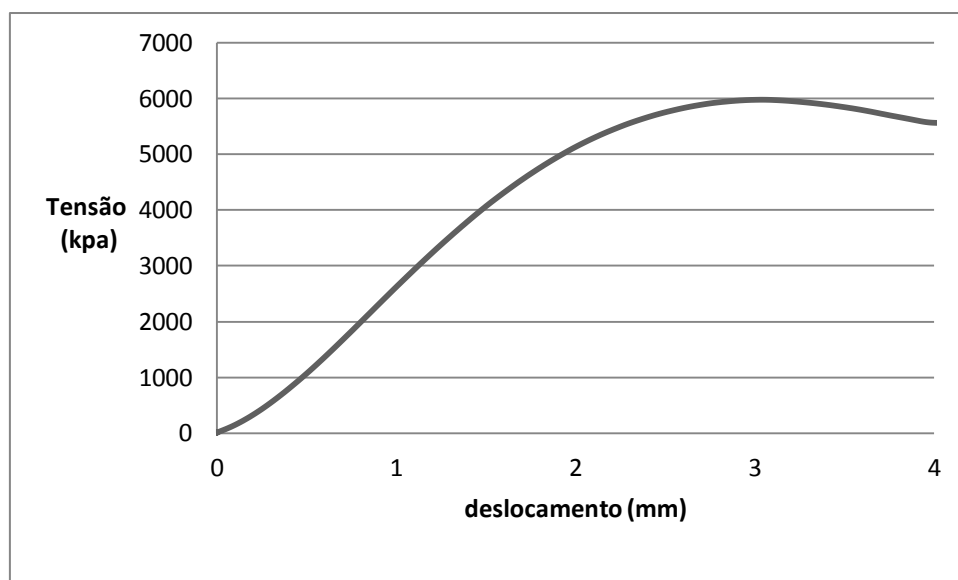


Figura B.4 - Comportamento da amostra nº131 a 35°C e 5mm/s

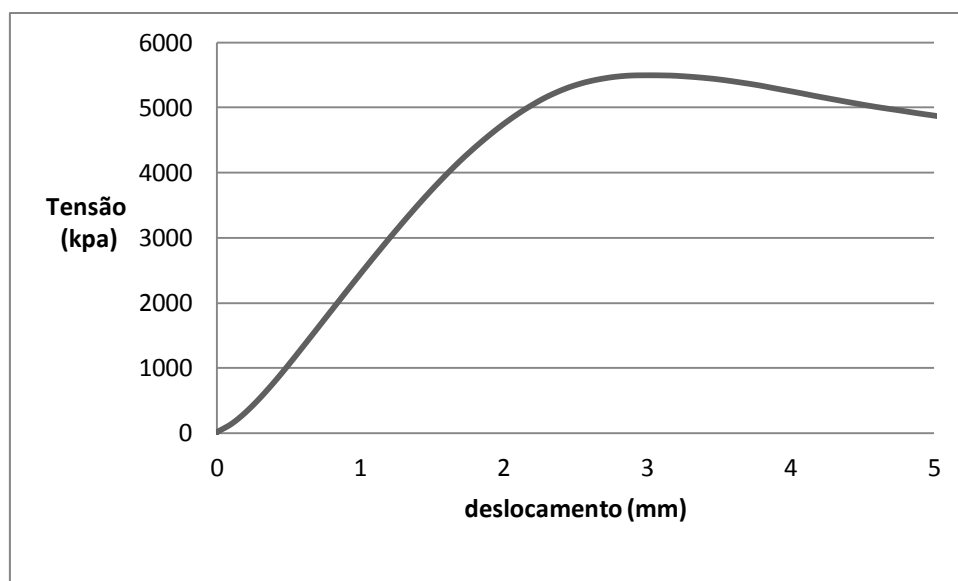


Figura B.5- Comportamento da amostra nº159 a 35°C e 5mm/s

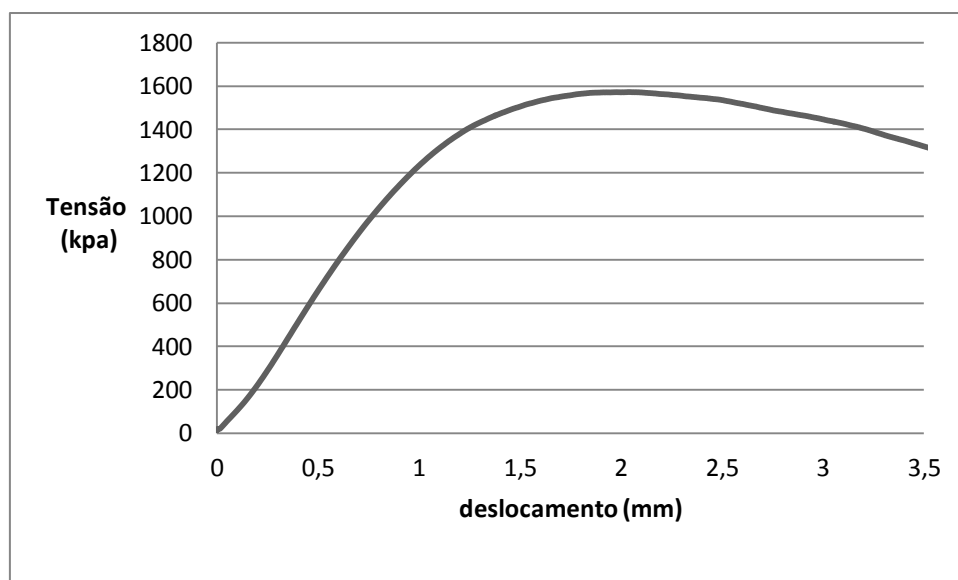


Figura B.6 - Comportamento da amostra nº243 a 50°C e 0,1mm/s

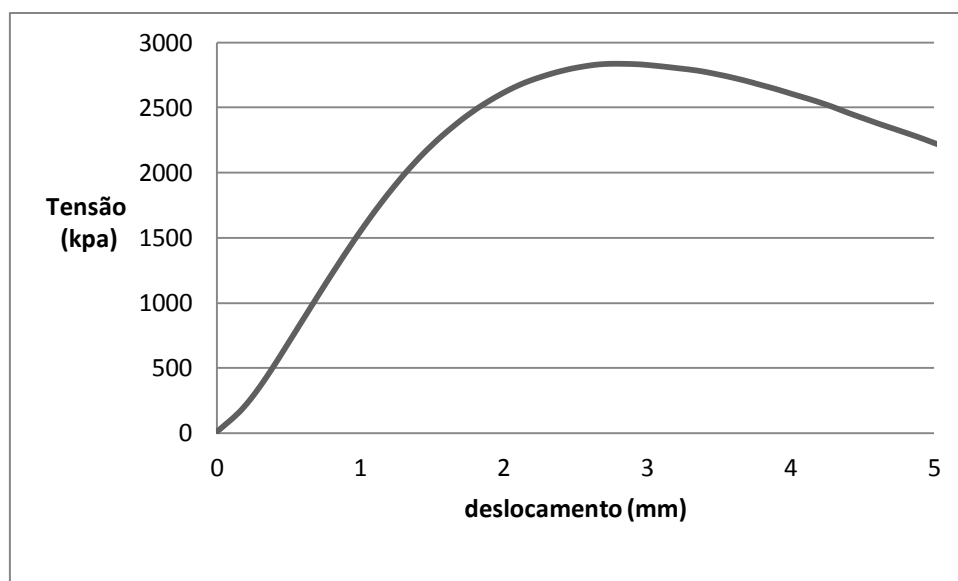


Figura B.7- Comportamento da amostra nº251 a 50°C e 5mm/s

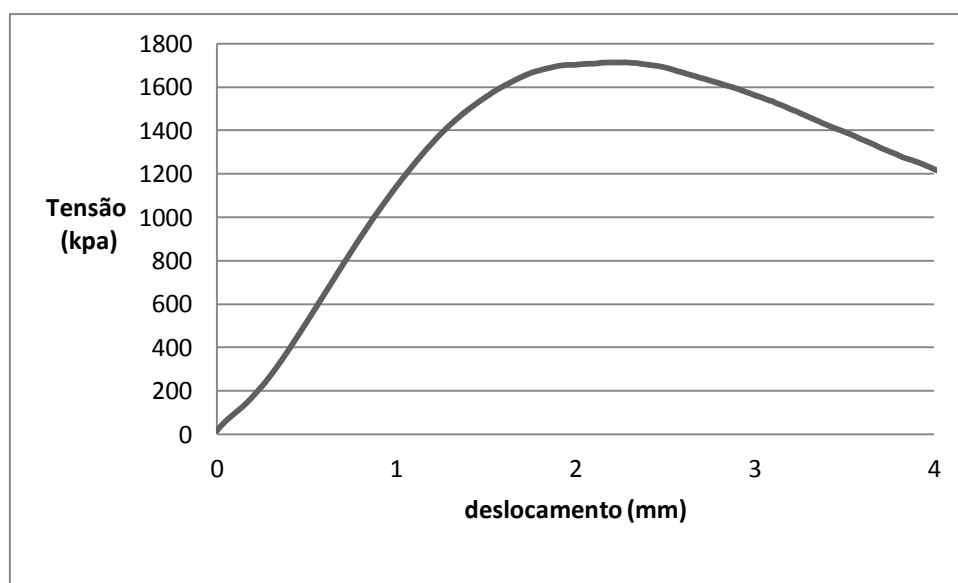


Figura B.8- Comportamento da amostra nº59 a 65°C e 0,1mm/s

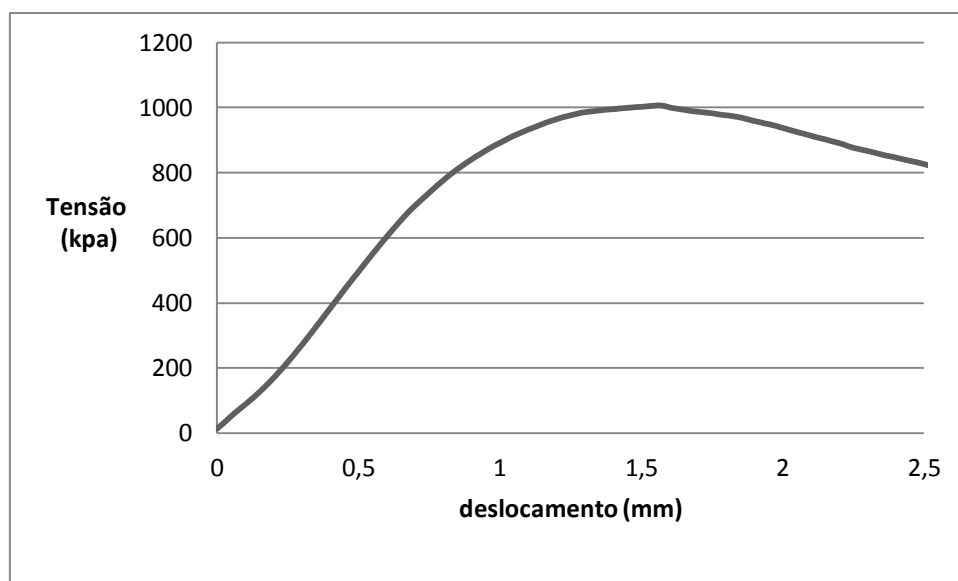


Figura B.9- Comportamento da amostra nº253 a 65°C e 0,1mm/s

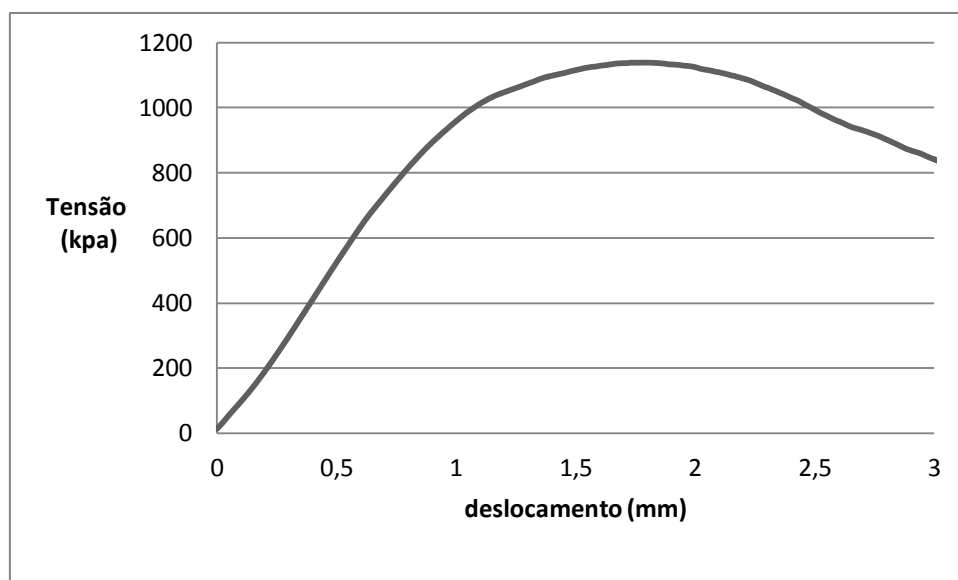


Figura B.10 - Comportamento da amostra nº254 a 65°C e 0,1mm/s

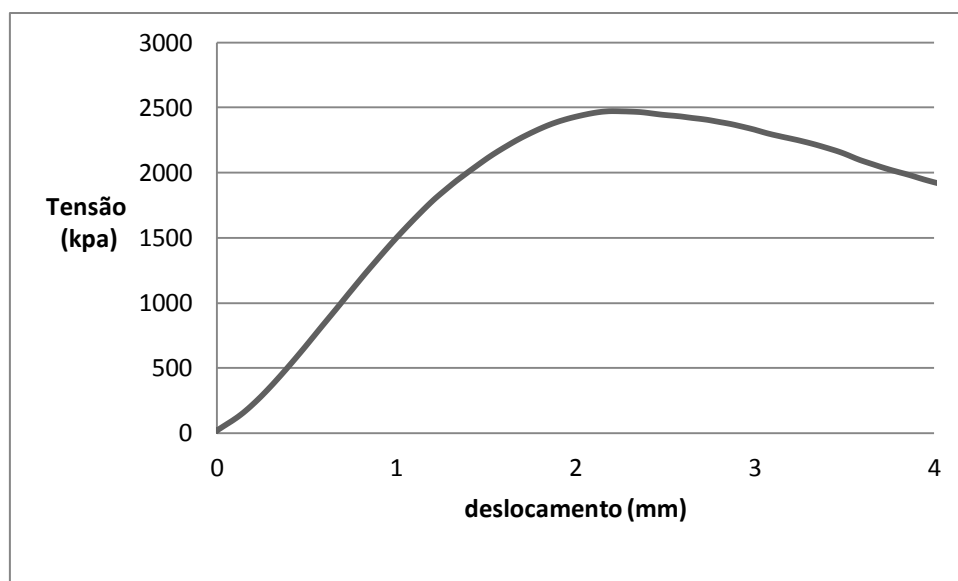


Figura B.11- Comportamento da amostra nº141 a 65°C e 1mm/s

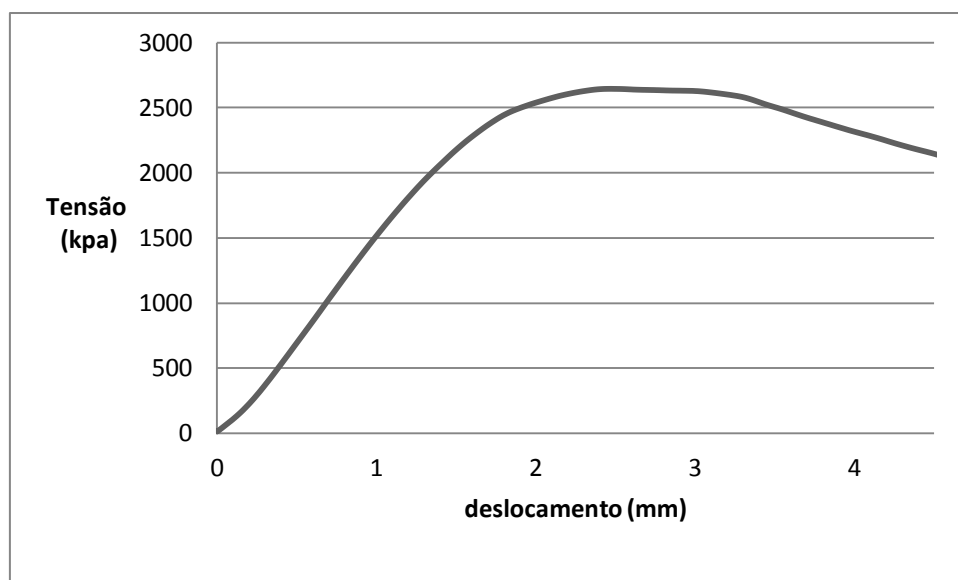


Figura B.12 - Comportamento da amostra nº138 a 65°C e 5mm/s

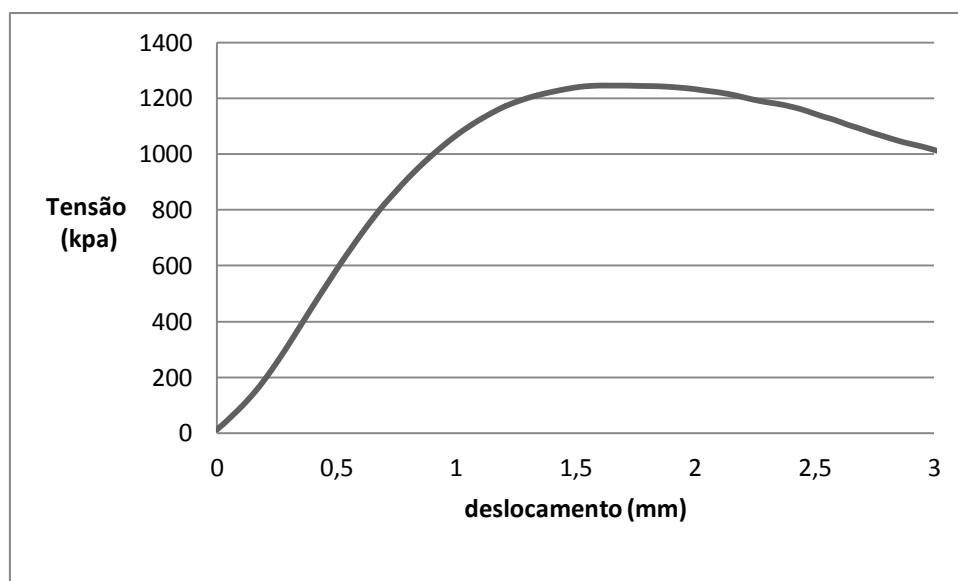


Figura B.13 - Comportamento da amostra nº250 a 65°C e 5mm/s

B.2 - Resultados da Camada de Desgaste

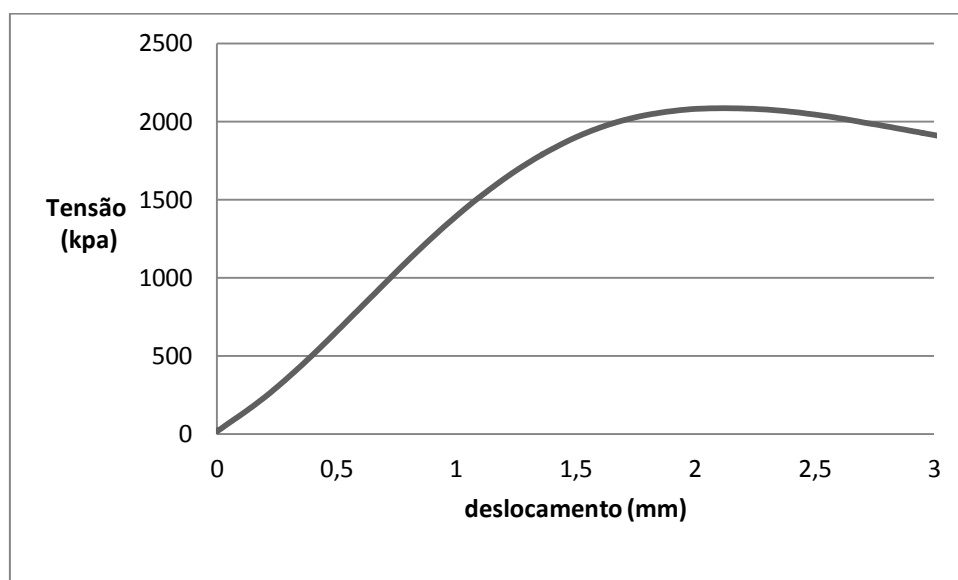


Figura B.14 - Comportamento da amostra nº339-324 a 35°C e 0,1mm/s

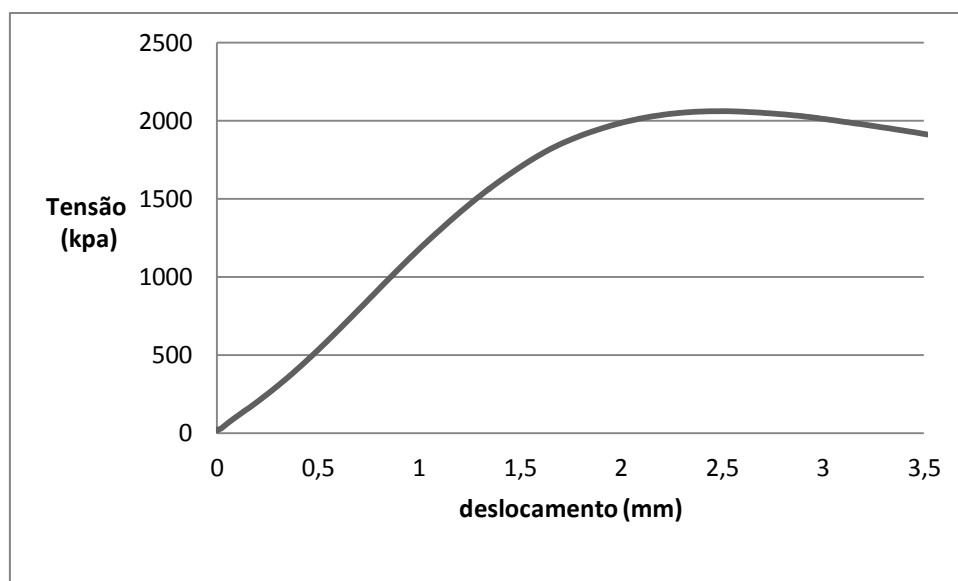


Figura B.15 - Comportamento da amostra nº370-316 a 35°C e 0,1mm/s

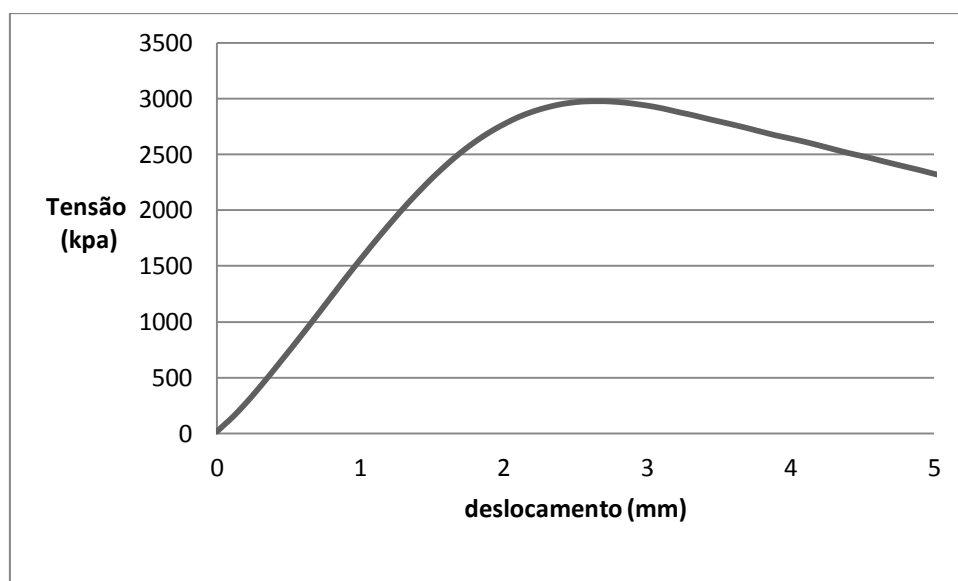


Figura B.16 - Comportamento da amostra nº302-322 a 35°C e 1mm/s

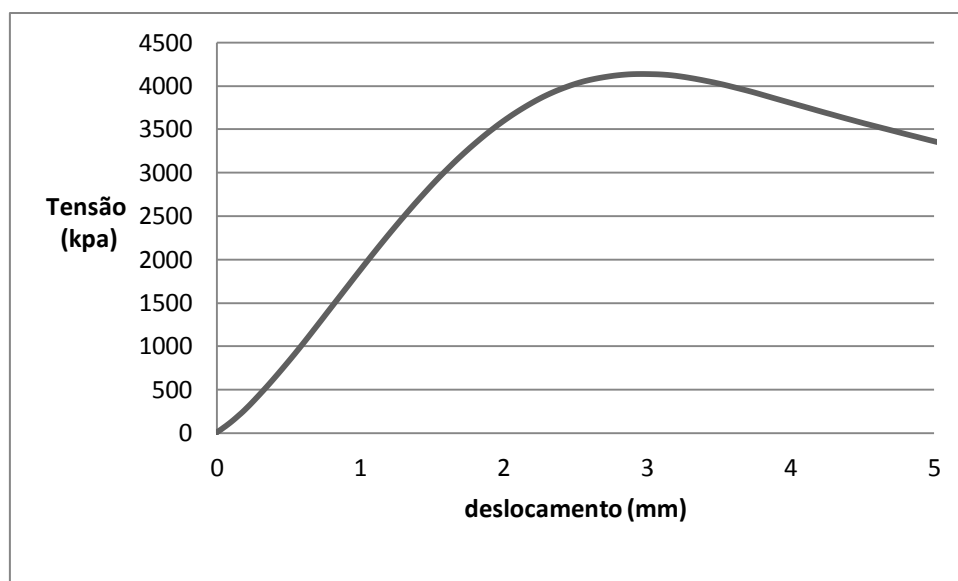


Figura B.17- Comportamento da amostra nº326-318 a 35°C e 5mm/s

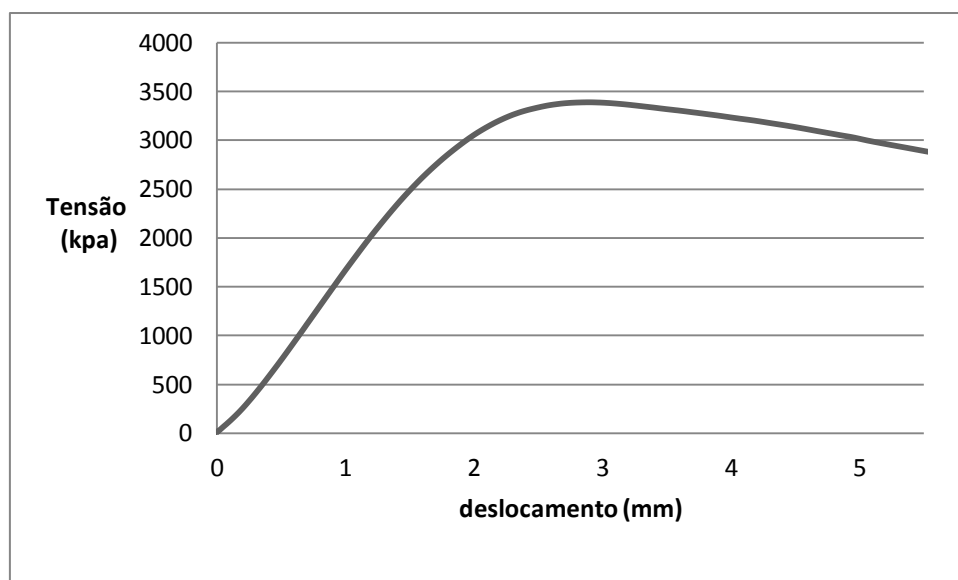


Figura B.18 - Comportamento da amostra nº344-332 a 35°C e 5mm/s

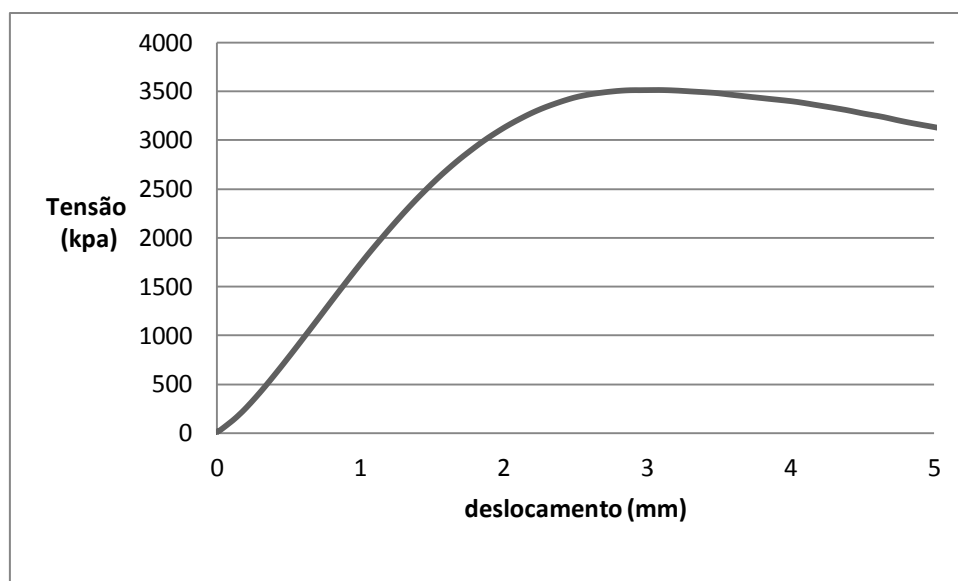


Figura B.19 - Comportamento da amostra nº348-351 a 35°C e 5mm/s

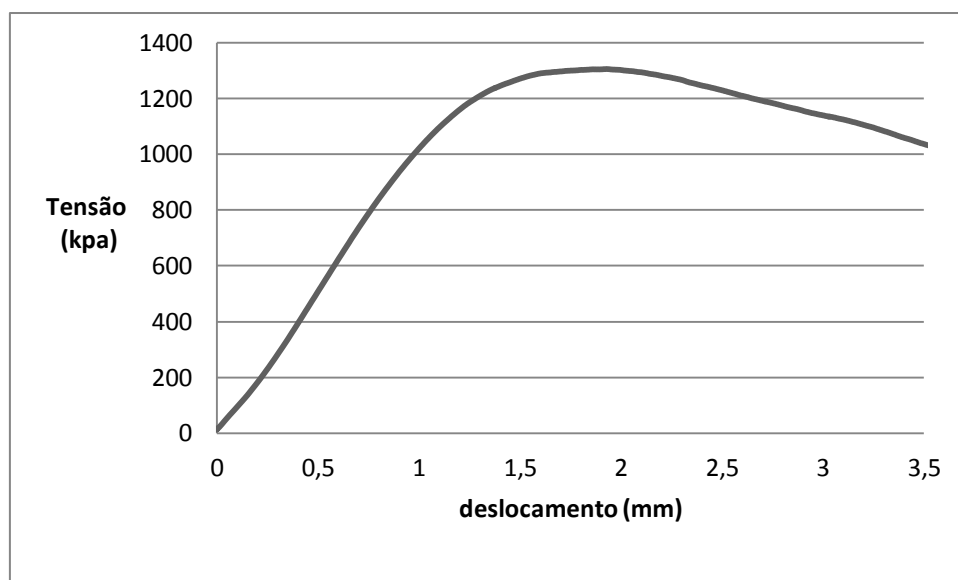


Figura B.20 - Comportamento da amostra nº279-267 a 50°C e 0,1mm/s

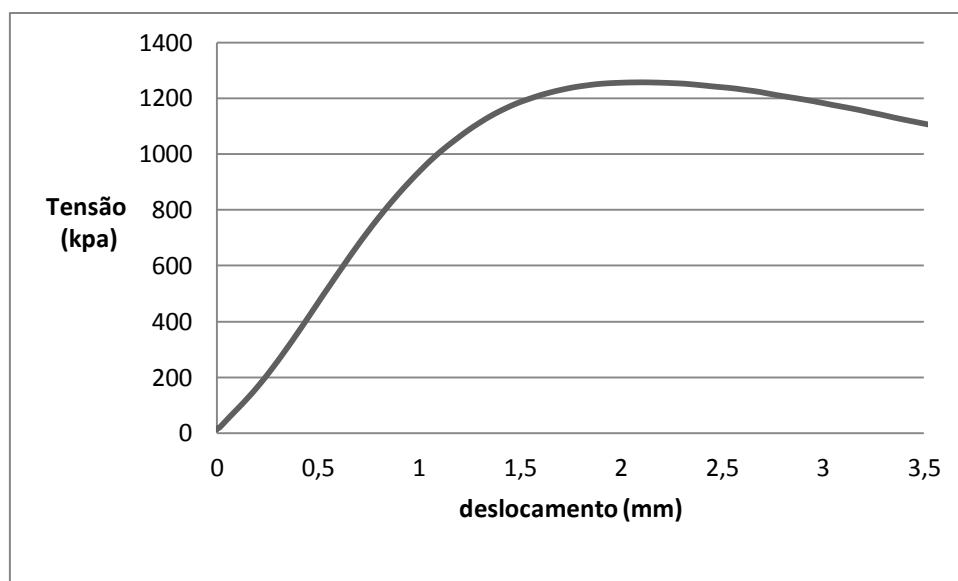


Figura B.21 - Comportamento da amostra nº299-309 a 50°C e 5mm/s

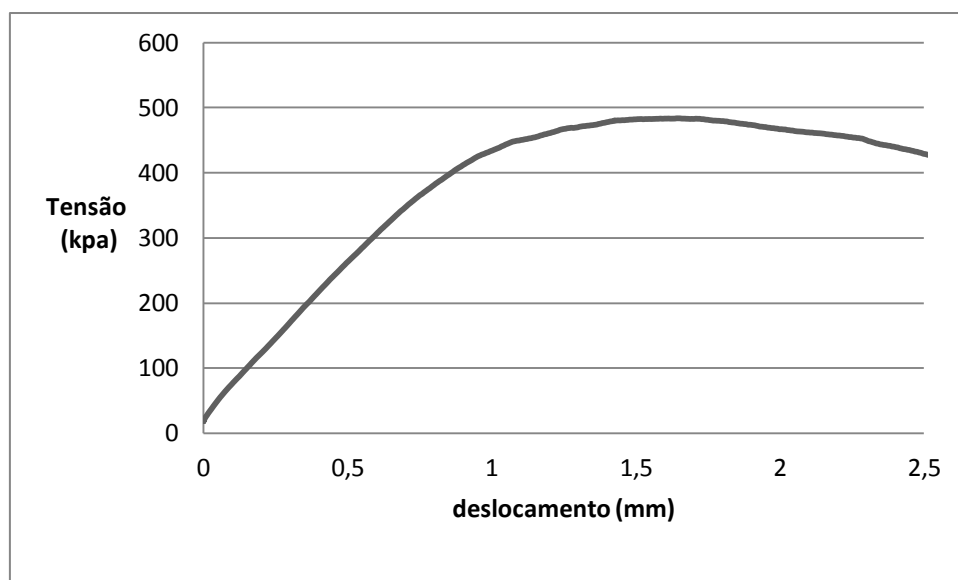


Figura B.22 - Comportamento da amostra nº320-342 a 65°C e 0,1mm/s

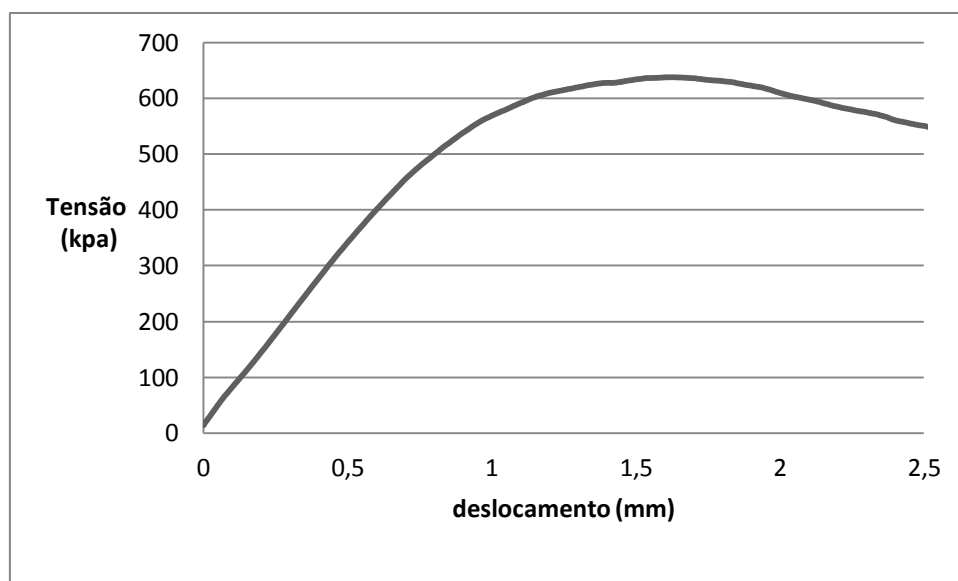


Figura B.23 - Comportamento da amostra n°346-314 a 65°C e 0,1mm/s

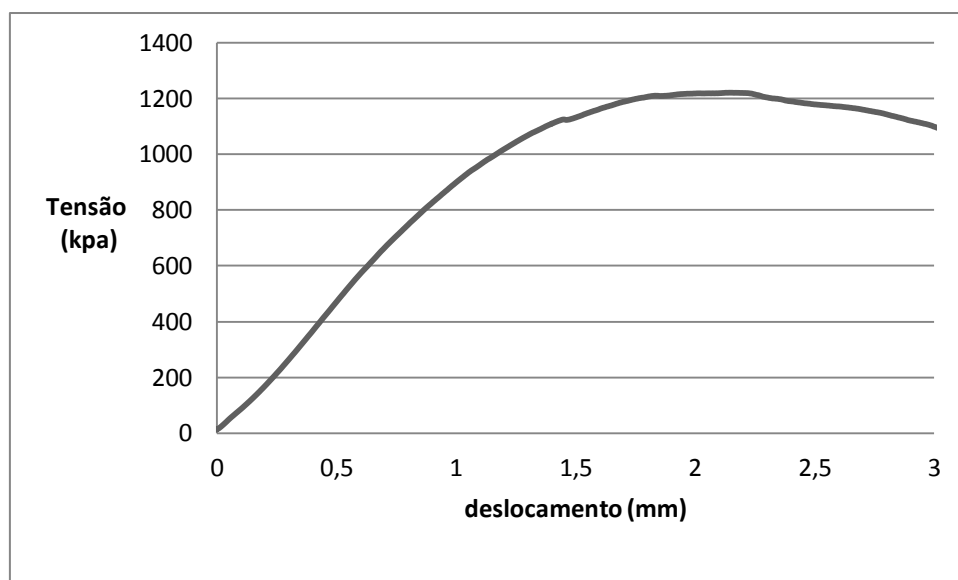


Figura B.24 - Comportamento da amostra n°356-365 a 65°C e 0,1mm/s

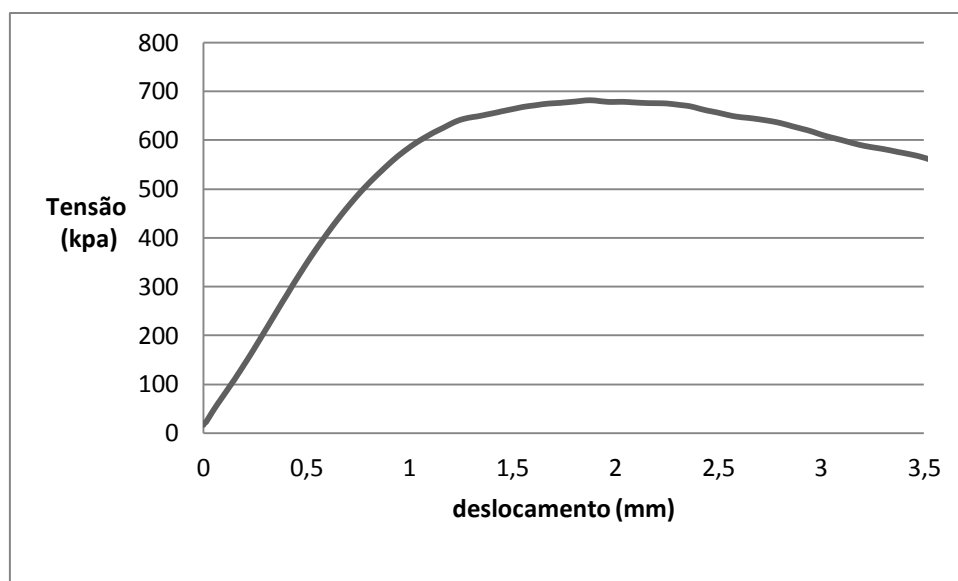


Figura B.25 - Comportamento da amostra nº354-371 a 65°C e 1mm/s

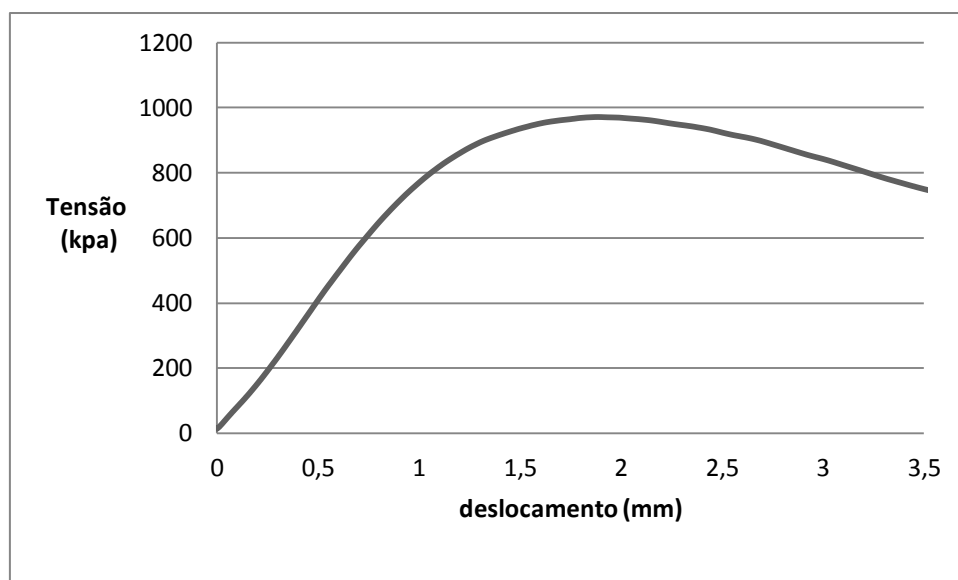


Figura B.26 - Comportamento da amostra nº301-290 a 65°C e 5mm/s

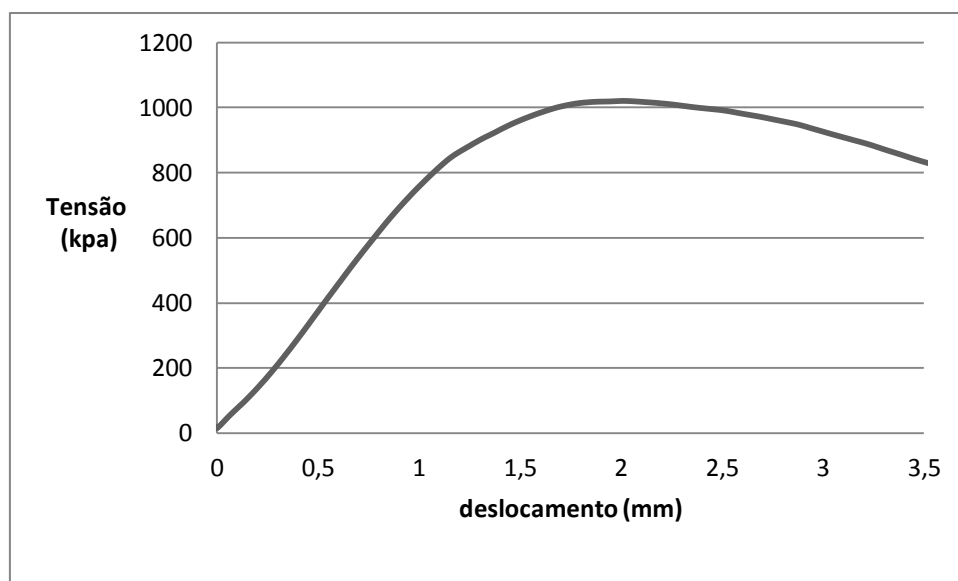


Figura B.27 - Comportamento da amostra nº311-337 a 65°C e 5mm/s